

M  
530.41  
0821  
=3

碩士學位論文

ISO표준에 의한 구조용 금속재료의  
대기부식성 평가에 관한 연구



濟州大學校 大學院

機械工學科

梁 景 兆

2004年 12月

# ISO표준에 의한 구조용 금속재료의 대기부식성 평가에 관한 연구

指導教授 金 貴 植

梁 景 兆

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



제2004 年교 12月 도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

梁景兆의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

정 동원



委 員

김 상진



委 員

김 리석



濟州大學校 大學院

2004 年 12月

**A Study on Atmospheric Corrosivity  
Evaluation of Structural Metals  
by the ISO Standard**

**Kyeong-Cho Yang**

(Supervised by professor Gui-Shik KIM)



A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirements for the degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2004

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Summary .....	v
I. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구목적 .....	2
II. 부식성 평가방법 .....	4
III. 실험재료 및 방법 .....	10
3.1 측정 장소 .....	10
3.2 대기부식의 환경영향인자 측정 .....	11
3.3 표준 금속재료의 부식측정 시험 .....	12
3.3.1 실험재료 .....	12
3.3.2 부식량 조사 .....	13
3.4 옥내 및 옥외 폭로시험 .....	14
IV. 결과 및 고찰 .....	18
4.1 대기부식의 환경 영향인자 .....	18
4.2 표준시험편의 부식량 .....	20
4.3 재료의 계절별 부식량과 3개월 단위의 시험편 부식량 .....	31
4.4 대기환경의 부식등급과 실험재료의 무게감량 부식등급 .....	40
4.5 대기부식 영향 인자의 다중회귀 분석 .....	44

4.6 표준 금속재료의 부식 기구 .....	49
4.6.1 탄소강 .....	49
4.6.2 구리 .....	52
4.6.3 아연 .....	52
4.6.4 알루미늄 .....	54
 V. 결    론 .....	 55
 참 고 문 헌 .....	 57
부    록 .....	59



## List of Tables

Table 1 A systematic diagram of atmospheric corrosion evaluation .....	5
Table 2 Atmospheric Corrosivity of ISO standard .....	6
Table 3 Wetness classification based on the time of wetness .....	6
Table 4 Sulfur dioxide and chloride classes .....	7
Table 5 The corrosion class with the atmosphere environment class .....	8
Table 6 Class of corrosivity .....	9
Table 7 Corrosivity categories from one year exposure data .....	9
Table 8 The characteristics of the sites .....	11
Table 9 Classes of TOW, sulfur dioxide and chloride .....	42
Table 10 Classes of corrosivity .....	42
Table 11 ISO 9223 corrosion classes of Caribbean areas for one year .....	43
Table 12 ISO 9223 atmospheric environment classes of Caribbean areas for one year .....	43
Table 13 Regression analysis for Carbon steel, Cu, Zn and Al .....	45

## List of Figures

Fig. 1 Five test sites .....	10
Fig. 2 A dried gauze method for $\text{Cl}^-$ measurement .....	12
Fig. 3 Test specimens .....	13
Fig. 4 The test sites for indoor and outdoor .....	17
Fig. 5 Sulfur dioxide .....	18
Fig. 6 Airborne chloride .....	19
Fig. 7 Time of wetness .....	19
Fig. 8 The corrosion weight gain and loss of four metal specimens in indoor and outdoor test for one year .....	21
Fig. 9 Seasonal corrosion weight loss .....	32
Fig. 10 Corrosion weight loss during three monthly exposure .....	35

## SUMMARY

Jeju Island, Korea is a clean area with traditional culture well preserved with a natural environment. Air pollution has recently become serious problems as the urbanization followed by industrialization. This study has been conducted to investigate corrosivity of a standard metals plates of Carbon steel, Cu, Zn and Al for one year from Sep. 2003 to Aug. 2004. A model of ISO 9223-ISO 9226 that represents the relations between metal corrosions and environmental parameters was used for atmospheric corrosion evaluations.

Environmental parameters for these evaluations are time of wetness, SO<sub>2</sub> and Chloride. Corrosion rates for four metals which are exposed indoors and outdoors were measured on five locations in Jeju Island; Gosan, Seogwipo, Seongsan, Chuna and Jeju city.

The results are as follows;

(1) The environmental factor of atmospheric corrosion of Jeju Island for SO<sub>2</sub> class is P0, a clean area. TOW as T3 and T4 indicates that Jeju has the characteristics of a tropical area. Chlorides class within 3 km from the coast show the features of costal area as S2 and S3 classes. Chuna show the features of woodland as a S1 class.

(2) In atmospheric corrosion of each area in Jeju, the atmosphere environmental factors, TOW and Cl<sup>-</sup>, were influenced more in Gosan and Seongsan than in Jeju city, Seogwipo and Chuna. Also,



seasonally, summer is the most activate for corrosion rates.

(3) Through multi-regression analysis, it shows that two environmental factors of TOW and  $\text{Cl}^-$  are deeply related to atmospheric corrosion. The atmospheric corrosive rates of the carbon steel are larger than those of other metals The next rates are corrosive Copper, Zinc, Aluminium in order.

(4) Corrosion classes evaluated by the atmosphere environmental factors were similar to outdoor corrosion classes measured by metal corrosion.



# I. 서론

## 1.1 연구배경

최근 지구환경의 오염이 심각해지고 있으며, 그에 따라 환경오염의 원인, 피해정도, 해결방안에 대한 관심도가 커지고 있다. 특히 대기오염은 인간을 비롯한 모든 생명체에 생물학적 악영향을 미칠 뿐 아니라, 산업용 부품 및 구조물 등의 무생물에도 부식손상을 가져와서 재산상의 막대한 손실을 초래한다.

대기오염에 의한 부식 피해는 공업지대나 대도시에서 매우 심하게 나타나며, 특히 산업기계들이 소형화, 집적화 되는 추세에 따라 대기오염으로 인한 부식이 장치의 성능 및 수명에 치명적인 단축을 초래하고 있다. 또한 해안지대에 위치한 도시에서는 대기오염으로 인한 부식과 더불어 해양입자가 중요한 부식 성분이 된다. 해양입자의 양은 해안으로부터의 거리, 풍향, 풍속 등에 따라서 달라지지만 염분의 부착은 부식 속도를 크게 증가시키며 적절한 방식 대책을 수립하지 않을 경우 심각한 부식손상을 초래한다.

국내의 경우 최근 대기오염에 의한 부식문제에 대한 환경단체의 관심은 점차 커지고 있는데, 1999년 환경운동연합의 대기오염물질에 의한 금속 부식도 조사, 2001년 경주 환경연합의 대기오염에 의한 문화재의 부식에 대한 보고서가 있으나, 대기부식에 대한 체계적인 연구는 거의 없다. 예를 들면 아래와 같은 다양한 대륙별 대기부식 프로그램이 진행되고 있다. ISO CORRAG Collaborative Exposure Program 은 유럽과 북중미, 일본 등지에서 1년, 2년, 4년, 8년간의 대기노출시 부식성 평가를 하는 대기부식 프로그램이다. MICAT(Iberoamerican Atmospheric Corrosion Map Project)은 북중미의 14개국 72장소에서 1988년부터

Iberoamerican의 부식지도를 구축, 대기부식 현상의 해석 제공하고 기상과 대기오염의 함수로서 금속부식속도를 예측할 수 있는 수학적 모델링을 위한 부식성 평가 프로그램이다. ICP/UNECE Program은 유럽과 북미에서 농작물, 산림, 수자원, 고문화재에 미치는 대기오염과 오존의 영향조사를 위한 프로그램이고, North-East Asia Program은 한국, 일본, 중국의 극동 3국의 여러 지역에서 문화재 재료 보호 차원에서 지역별 대기 부식속도를 조사하는 프로그램으로 여기서 한국의 측정 site는 대구와 대전의 2개 도시이다.[1]

최근 세계의 여러 도시에서 ISO CORRAG Program과 연계하여 대기부식의 연구 조사가 진행되고 있는데 ISO 9223-9226 에 대기부식시험 표준이 제정되어 있다.

## 1.2 연구목적

제주도는 지역적으로 천혜의 자연환경과 고유한 전통문화가 잘 보전된 청정지역이며, 지리적으로는 사면이 바다로 둘러 싸여 있어 독특한 동·식물군의 서식지이나 외부 충격에 약한 특성이 있다. 또한 제주도의 도시는 주로 해안 지대에 형성되어 있으므로 대기오염 외에 해염 입자가 주성분인 대기 중 염화물(Airborne Chloride)에 항상 노출되어 있고, 상대습도와 대기온도 등에 관계되는 습윤 시간(TOW)이 타 도시에 비해 많으므로 부식성을 크게 지닌 도시이다. 그리고 최근 경제개발 위주 정책과 급속한 도시화, 관광개발의 촉진 등으로 대기정화 자원의 감소와 환경오염물질 배출이 증가되고 있다. 이러한 상황에서 국제자유화도시로서 산업발전을 고려하면, 제주도는 대기부식에 관한 조사 연구가 필요한 지역이다.

본 연구는 제주의 지역적 특성에 의한 기상, 대기오염이 금속부식에

미치는 영향을 2003년 9월부터 2004년 8월까지 1년간 조사하여, 환경 영향 인자들에 의한 부식성 등급을 평가하고, 주요금속 재료에 의한 부식성 등급을 평가하였다. 이렇게 평가한 자료를 바탕으로 대기부식성의 표준분류에 의한 방법으로 제주 지역의 대기 환경지표를 설정 하고, 그 환경지표에 따른 대기부식속도의 표준을 구하고자 한다.



## II. 부식성 평가방법

부식성의 평가는 Table 1 에 나타낸 것처럼 대기환경의 자료를 이용한 평가방법과 금속재료의 부식량에 따른 표준패널 방법을 이용하여 부식성을 평가하는 방법이 있다. 대기환경 자료의 측정방법은 습윤시간 자료와 아황산가스(SO<sub>2</sub>)와 대기 중 염화물(Cl<sup>-</sup>) 자료에 의하여 부식성 등급화 하는 것이고, 표준패널 방법은 대기 중에 금속재료를 노출하여 실제의 부식량을 측정하여 등급화 하는 방법이다. 이 두 가지의 부식성 등급을 비교하여 제주도 대기부식도의 평가를 하게 된다.

위의 두 가지 평가방법에 대한 국제적인 표준은 ISO 9223-9226에 명시되어 있으며 이것을 Table 2 에 나타낸다. ISO에서 표준화한 평가방법의 대기환경 실험인자들은 비교적 쉽게 측정할 수 있는 기상 데이터로 장기적인 금속의 부식성을 예측할 수 있다. 이들 표준에서 기본은 습윤시간(Time of Wetness; TOW)과 대기오염원인 아황산가스(SO<sub>2</sub>)와 대기 중 염화물(Cl<sup>-</sup>)의 농도를 근간으로 대기의 부식성을 등급화 하는 것이다. 이들 등급과 표준금속들에 대한 처음 1년간의 부식속도와의 상관관계에 대하여 ISO 9223에 제시되고 있으며, 그 이후 계속되는 부식속도 자료는 ISO 9224에서 얻을 수 있다. ISO 9225는 대기 환경인자의 측정방법을 규정하고 있으며, ISO 9226은 대기부식성 평가를 위하여 표준시험편을 사용하여 수집하는 부식속도 측정법이다.[2-5]

이 실험에서는 1년간의 실험기간을 설정하였기 때문에 ISO 9223에 제시한 대기부식시험 표준에 의거 대기의 부식성 등급을 5등급으로 나타낸다. 여기서 Table 3은 습윤시간에 대한 습윤등급을 나타내는 것으로서 0 °C이상의 온도에서 상대습도 80%이상인 되는 시간(TOW)을 측정하여 등급화 시키는 단위이다. Table 4는 이산화황과 염화물에 대한 등급을

정한 것으로 각각, <P>, <S>로 표시되고 4개의 등급으로 나누어지는데, Table 3의 습윤시간에 대한 습윤시간 등급과 연결되어 금속의 부식성 등급을 평가할 수 있도록 등급화 하고 있다. Table 5는 위의 대기 환경 영향인자를 조합하여 각 재료에 대한 대기환경영향인자의 부식도 등급을 표시한 것이다. Table 6은 부식도 등급을 <C>로 하여 5등급으로 구분한 것이고, Table 7은 실용금속 재료별로 부식량을 측정하였을 때 1년 동안 어떤 기준으로 등급화가 되는지에 대하여 나타낸 것이다.

이렇게 대기환경의 부식성 평가는 대기의 환경적요인과 각 재료별의 부식량에 대하여 등급화를 하고 이 두 가지의 평가된 등급을 가지고 비교 분석하여 평가를 하게 된다. 이 실험에서는 위에서 설명한 평가 방법을 이용하여 보다 정확한 제주지역의 부식성 등급을 평가하게 된다.[6]

Table 1 A systematic diagram of atmospheric corrosion evaluation

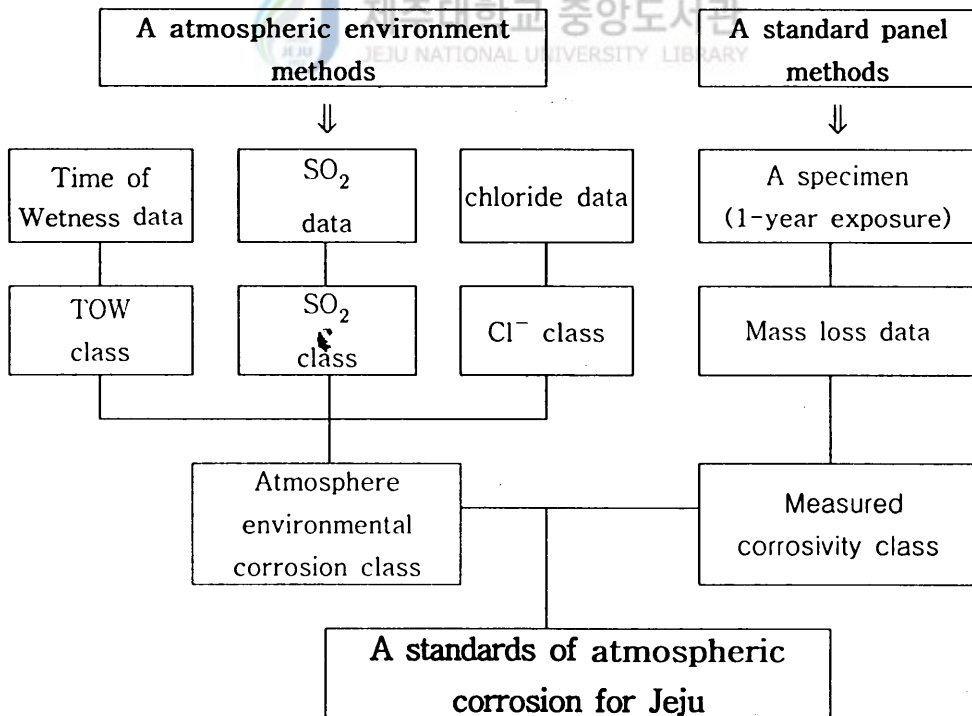


Table 2 Atmospheric Corrosivity of ISO standard

ISO standard	Title
ISO 9223	Classification of corrosivity of atmospheres
ISO 9224	Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres
ISO 9225	Aggressivity of atmospheres-methods of measurement of pollution data
ISO 9226	Corrosivity of atmospheres-methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity

Table 3 Wetness classification based on the time of wetness

Wetness Class	Time of Wetness		Examples of occurrence
	hour/year	%	
T1	< 10	< 0.1	Indoor
T2	10-250	0.1-3	Indoor, unheated
T3	250-2600	3-30	Outdoor, dry, cold climate
T4	2600-5200	30-60	Outdoor temperate climate
T5	> 5200	> 60	Tropical outdoor or surf

Table 4 Sulfur dioxide and chloride classes

SO <sub>2</sub> (sulfation plate measurement)			Chloride (chloride candle measurement)	
Sulfur dioxide Class	Deposition Rate mg/m <sup>2</sup> /day	Concentration mg/m <sup>3</sup>	Chloride Class	Deposition Rate mg/m <sup>2</sup> /day
P0	<10	<12	S0	< 3
P1	10-35	12-40	S1	3-60
P2	36-80	41-90	S2	61-300
P3	81-200	91-250	S3	> 300

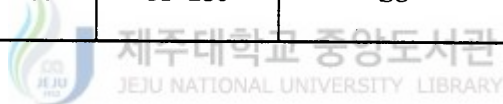




Table 5 The corrosion class with the atmosphere environment class

(1)Carbon Steels

	T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
P0-P1	C1	C2	C3C4	C2C3	C3C4	C4	C3	C4	C5	C4	C5	C5
P2	C1C2	C3C4	C3C4	C3C4	C3C4	C4C5	C4	C4	C5	C5	C5	C5
P3	C2	C3	C4	C4C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5

(2)Zinc & Copper

	T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
P0-P1	C1	C1C2	C3	C3	C3	C3C4	C3	C4	C5	C4	C5	C5
P2	C1C2	C2	C3	C3	C3C4	C4	C3C4	C4	C5	C5	C5	C5
P3	C2	C3	C3C4	C3	C3C4	C4	C4C5	C5	C5	C5	C5	C5

(3)Aluminum

	T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
P0-P1	C1	C2C3	C4	C3	C3C4	C4	C3C4	C3C4	C5	C4	C5	C5
P2	C1C2	C3C4	C4	C3	C4	C4C5	C3C4	C4	C5	C5	C5	C5
P3	C2C3C4	C4	C4	C3C4	C4C5	C5	C4C5	C5	C5	C5	C5	C5

T: TOW class, P: SO<sub>2</sub> class, S: Chloride class, C: Corrosion class

Table 6 Class of corrosivity

Class	Corrosivity
C1	Very Low
C2	Low
C3	Medium
C4	High
C5	Very High

Table 7 Corrosivity categories from one year exposure data

Corrosivity	Corrosion rate( $r_{cor}$ ) of metals				
	Unit	Carbon steel	Zinc	Copper	Aluminium
C1	g/(m <sup>2</sup> .yr)	0-10	0-0.7	0-0.9	negligible
	μm/yr	0-1.3	0-0.1	0-0.1	
C2	g/(m <sup>2</sup> .yr)	10-200	0.7-5	0.9-5	0-0.6
	μm/yr	1.3-25	0.1-0.7	0.1-0.6	
C3	g/(m <sup>2</sup> .yr)	200-400	5-15	5-12	0.6-2
	μm/yr	25-50	0.7-2.1	0.6-1.3	
C4	g/(m <sup>2</sup> .yr)	400-650	15-30	12-25	2-5
	μm/yr	50-80	2.1-4.2	1.3-2.8	
C5	g/(m <sup>2</sup> .yr)	650-1500	0-60	25-50	5-10
	μm/yr	80-200	4.2-8.4	2.8-5.6	

### III. 실험재료 및 방법

#### 3.1 측정 장소

측정장소는 실험 특성상 실험기간이 장기간이고 시험편의 노출각도와 배치, 노출장소 등에 따라 실험결과의 수집이 큰 차를 나타내므로, 제주의 전 지역을 대표할 수 있고 기상관측의 각종 자료획득이 용이하며 지역적 기후의 특색에 대한 정보를 가장 많이 가지고 있는 제주시청 대기오염 측정망, 고산 기상대, 서귀포 기상대, 성산포 기상대, 어승생 천아오름 대기오염 측정망의 위치에 부식도 측정 장소를 선정했다. 이 지역들은 지역별로 각기 다른 지역적 특색을 가지고 있을 뿐만 아니라 대기 중 염화물(Airborne Chloride)의 농도와 가장 밀접한 해안에서의 거리도 각각 다른 특색을 가지고 있어 측정 장소로 선정 하였다. 각 측정 장소의 위치를 Fig. 1에 나타내었고, 측정지점의 지리적 특색을 Table 8에 나타냈다. 실험 특성상 옥내노출 시험과 옥외노출 시험이 있기 때문에 지반이 견고 하고 24시간 양지가 형성되고, 통풍 및 지열로 인한 습도 변화에 민감하지 않도록 잔디가 형성된 곳을 측정 장소로 선정 하였다.

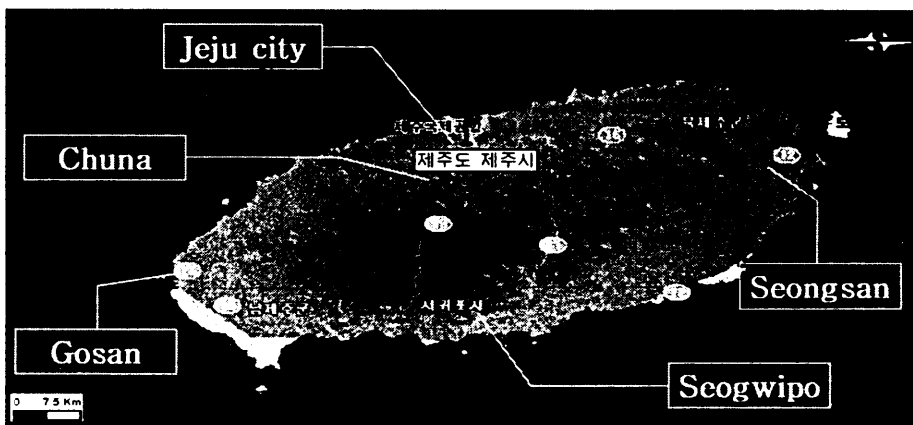


Fig. 1 Five test sites

Table 8 The characteristics of the sites

	seashore distance(km)	height(m)	Area characteristic
Gosan	0.1	71.21	coastal
Seogwipo	1.5	50.47	urban-coastal
Seongsan	1	18.62	coastal-rural
Chuna	11	700	forest
Jeju city	3	50	urban

### 3.2 대기부식의 환경영향인자 측정

대기부식의 환경영향인자는 습윤시간(TOW), 아황산가스(SO<sub>2</sub>), 대기 중 염화물(Airborne chloride: Cl<sup>-</sup>), 강우(Rain fall), 일조량, 풍속, 풍향 등 많은 인자가 있으나 이중 금속재료의 부식에 가장 영향을 많이 주는 TOW, SO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>에 대하여 조사하였다.

대기부식 환경 영향인자의 측정에 있어서 습윤시간과 아황산가스의 측정은 각 지역의 기상대와 천아오름의 대기오염 측정망의 측정 자료를 이용하여 측정하였고, 대기 중 염화물은 Fig. 2 에서 나타낸 바와 같이 면적 10cm×10cm의 건식 가제를 옥내 폭로대의 백엽상 내에 2개를 설치하고, 월별로 수거하여 가제에 포집된 염화물의 분석은 이온크로마토그래피로 염화물을 측정한다.

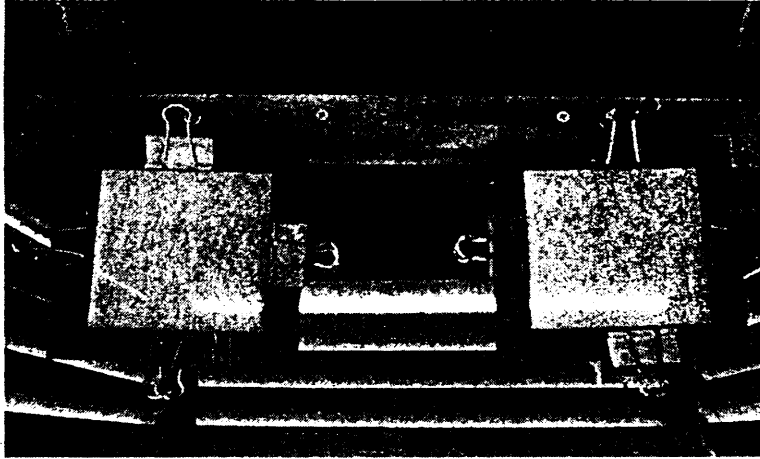


Fig. 2 A dried gauze method for  $Cl^-$  measurement

### 3.3 표준 금속재료의 부식측정 시험

#### 3.3.1 실험재료

실험재료는 탄소강판, 동판, 아연판, 알루미늄판 4종류로 하였으며, 시험편은 이들 재료를 가로 50mm, 세로 100mm, 두께 1mm의 크기로 가공하였다. 시험편 전 처리에 있어서 탄소강판과 동판은 에머리 #1200으로 양표면 연마하였고, 아연판, 알루미늄판은 양면 경면 연마를 했다. 표면연마 후의 시험편들은 아세톤에 의한 초음파 세척을 하여 데시케이터에 보관하였다. 이들 시험편의 사진을 Fig. 3에 나타낸다.

시험편의 수량은 한 재료별로 1개월 노출용 1개, 3개월 노출용 2개, 6개월 노출용 3개, 9개월 노출용 3개, 12개월 노출용 3개의 총 12개씩 옥내, 옥외에 설치하였다. 시험편 설치 판은 탄소강, 동, 아연, 알루미늄 4종류의 48개를 함께 설치되도록 제작하였고, 시험편 분리 및 결합이 용이하게 제작 하였으며 희생양극으로 인하여 부식이 발생하지 않도록 하기 위하여 각 시험편의 사이사이는 절연체로 고정을 하여 희생양극으로 인한 부식의 영향을 최소화 하였다.[7-12]

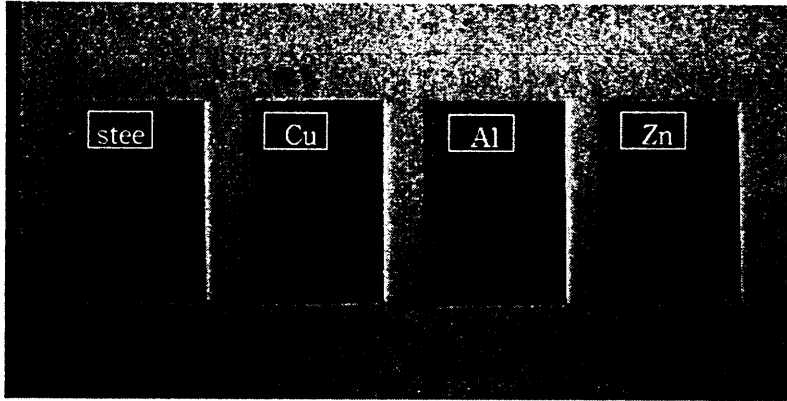


Fig. 3 Test specimens

### 3.3.2 부식량 조사

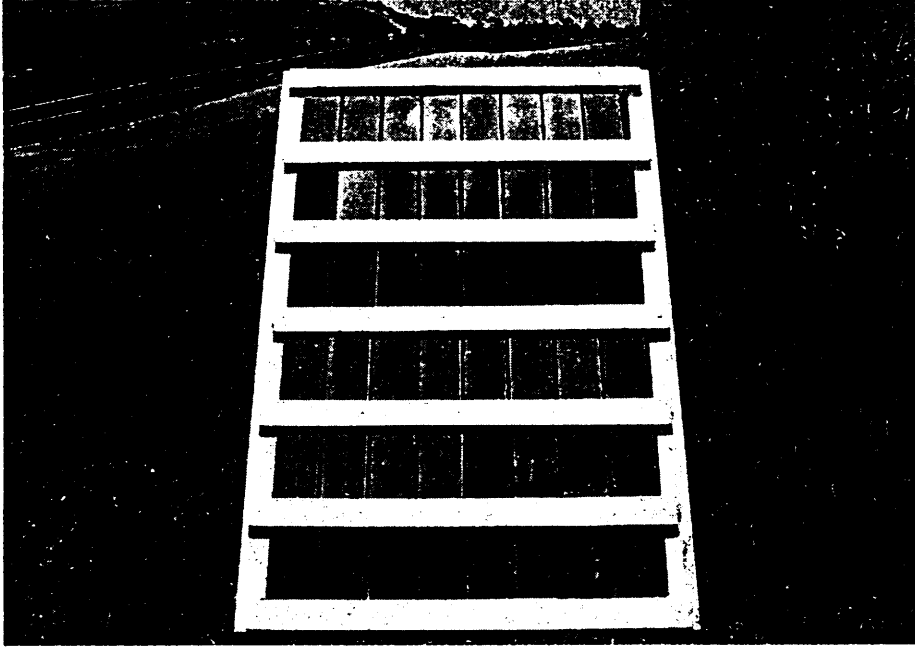
모든 시험편들은 시험 전에 초기무게를 전자저울(측정범위 1/10,000g)로서 측정 후 각 측정 장소에 설치하였다. 노출시험 후의 부식량의 측정은 수집된 시험편을 24시간 데시케이터에 보관하여 안정화 시켰다. 안정화 처리 후 부식생성물이 부착된 그대로의 무게를 부식증가량이라 하였고, 부식생성물을 제거한 후의 무게를 부식 감소량 이라 하였다. 부식증가량은 부식생성물이 부착된 무게와 초기 시험전의 무게의 차이이고, 무게감소량은 초기 시험전의 무게와 부식생성물을 제거한 후 무게의 차이를 나타낸다.

부식생성물의 제거는 KS D0006과 D9502에 의한 화학적 부식 생성물 제거 방법에 따라 제거하였다. 탄소강판의 경우 염산 (HCl 비중 1.19) 1000ml에 삼산화안티몬( $Sb_2O_3$ ) 20g과 염화제일주석 50g을 혼합한 용액에 20-25°C에서 10-25분을 침지시킨 후 수세하여 부식생성물을 제거 하였다. 동판은 염산 500ml에 증류수 500ml를 혼합한 용액에 20-25°C에서 1-3분 침지하였다. 염산처리를 해서 제거되지 않는 황산구리 부식생성물은 시안화나트륨(NaCN) 4.9g과 증류수 1000ml를 혼합한 용액에 20-25°C에서 1-3분 침지하여 수세한 후 부식생성물을 제거하였다. 알루미늄판은

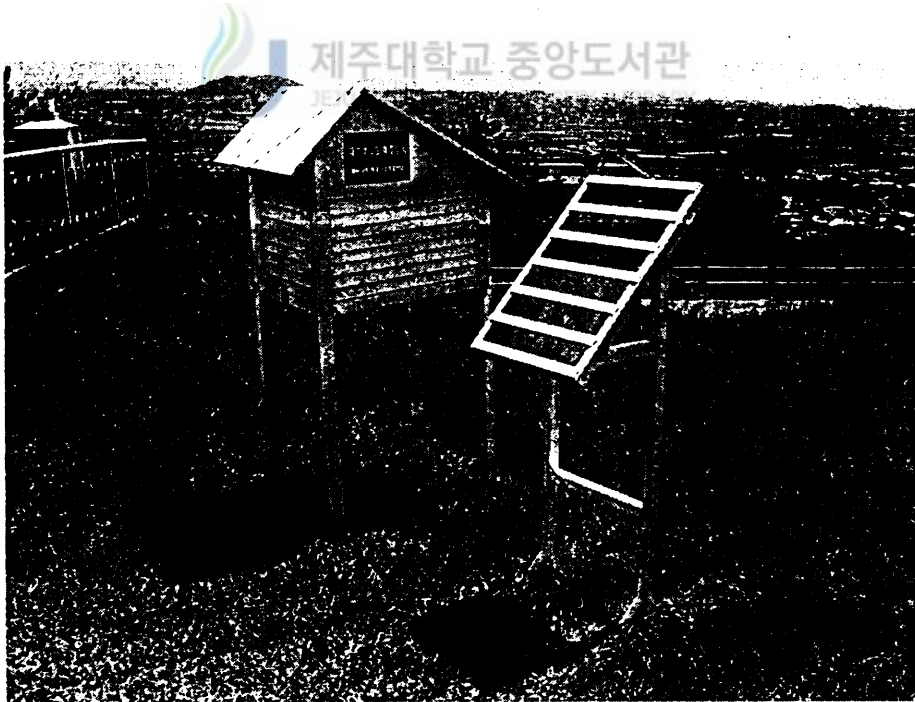
인산( $H_3PO_4$ ) 50ml와 산화크롬( $CrO_3$ ) 20g에 1000ml 증류수를 혼합하여 90°C에서 5-10분간 침지시켜 부식생성물을 1차 제거를 한 후에 알루미늄이 과잉 제거되는 반응을 방지하고 표면의 부착물 및 부피가 있는 부식 생성물을 제거하기 위하여 질산( $HNO_3$ , 비중 1.42) 용액에 20-25°C에 1-5분간 침지하여 수세한 후 부식생성물을 제거 하였다. 아연판은 수산화암모늄( $NH_4OH$ , 비중 0.90) 150ml과 증류수를 1000ml를 혼합한 용액에 20-25°C에서 5분정도 침지하였다. 그 후 산화크롬( $CrO_3$ ) 50g과 질산은( $AgNO_3$ ) 10g에 1000ml의 증류수를 혼합한 용액에 20-25°C에서 15-20초 침지하여 수세한 후에 부식생성물을 제거 하였다. 부식생성물 제거 후에 모든 시험편은 건조시를 시키고, 건조된 시험편은 아세톤에 초음파 세척을 한 후 탈수를 하여 온풍건조를 하고 수분간 안정화를 시킨 후에 무게 감소량을 측정하였다.

### 3.2 옥내 및 옥외 폭로시험

옥내와 옥외의 폭로대의 제작에 있어서 옥내 폭로대는 가로 700mm, 세로 500mm, 높이 1200mm인 백엽상을 제작하여 평면상에 시험편을 설치하도록 하였다. 옥내 폭로대 안에는 옥외 폭로대에 설치한 시험편 설치대를 설치하였다. 옥외 폭로대는 가로 700mm, 세로 500mm, 높이 1200mm의 크기로 제작하고, 45° 경사지게 설치하여 45°의 시험편 노출 각도를 갖도록 하였다. 옥내와 옥외 폭로대는 일조량이 항상 일정하고 통풍이 잘되며 풍향과 풍속에 제약을 받지 않는 평탄한 지반에 설치하였으며, 각 측정 장소에서 정남향으로 설치하였다. 그러나 제주시청 측정 장소에서는 폭로대 설치공간의 제약으로 일조량에 제약을 받는 지점에 설치하게 되었고, 시험편 설치 방향도 다른 지역과는 다른 동쪽 방향으로 설치하였다. 시험편 설치대와 각 측정 장소에 설치된 폭로대의 모습을 Fig. 4에 나타낸다. [13,14]

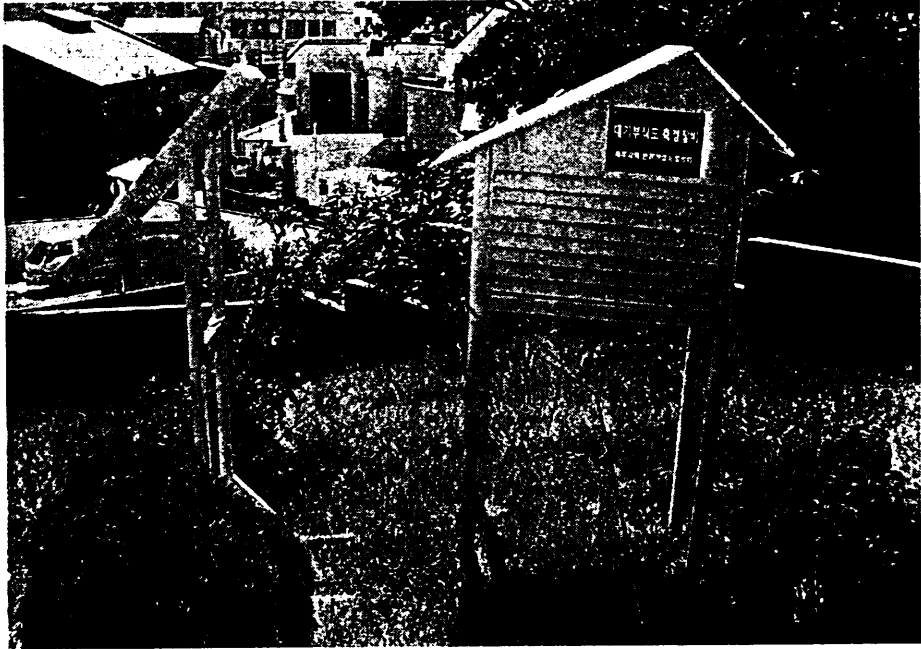


(a) Specimen test bed

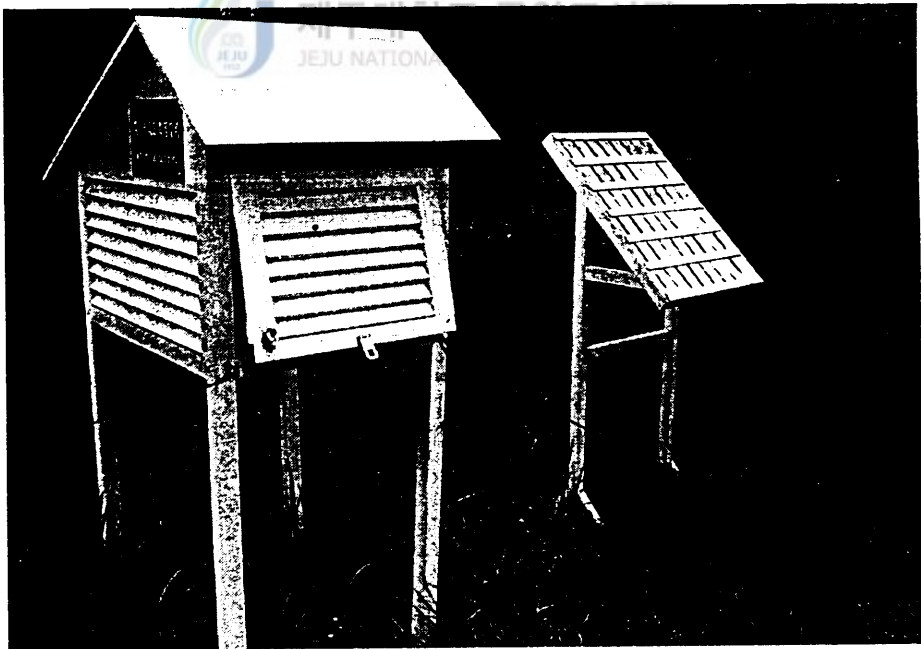


(b) Gosan site





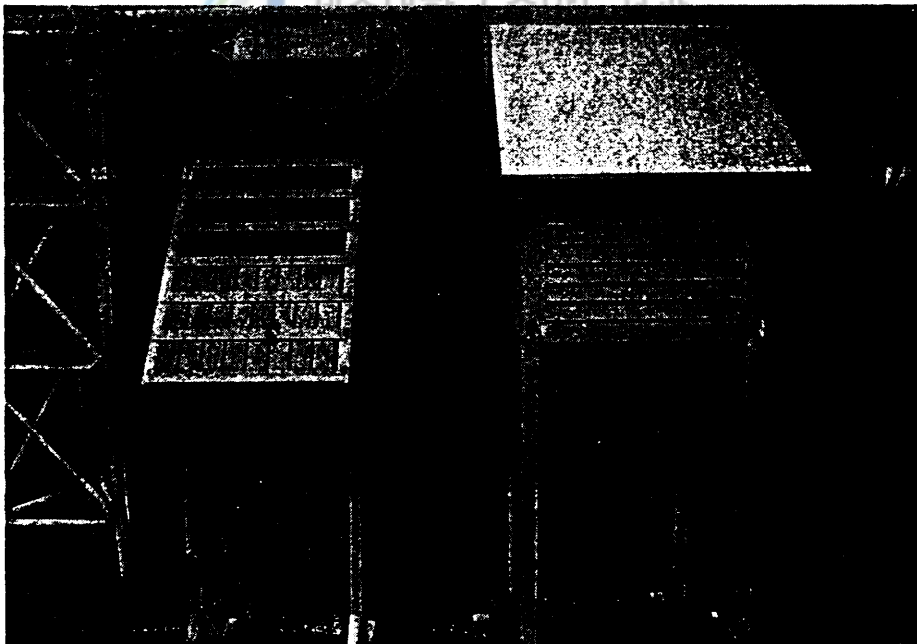
(c) Seogwipo city site



(d) Chuna site



(e) Seongsan site



(f) Jeju city site

Fig. 4 The test sites for indoor and outdoor

## IV. 결과 및 고찰

### 4.1 대기부식의 환경 영향인자

측정 장소에서 ISO 표준에 의한 대기 환경인자 즉 아황산가스(SO<sub>2</sub>), 대기 중 염화물(Cl<sup>-</sup>), 습윤시간(TOW), 등의 측정 자료를 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 5에서 나타낸 SO<sub>2</sub> 농도는 전체적으로 미량이지만 지역적으로는 도심지인 제주시청에서의 농도가 가장 크게 나타나고 12월, 1월, 2월이 다른 달에 비해 아황산가스가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 Cl<sup>-</sup>의 농도는 해안에 인접한 고산이 다른 지역에 비해 매우 높게 나타남을 알 수 있고, 해안에서의 원거리 순서인 성산, 제주, 서귀, 천아오름의 순으로 나타남을 알 수 있다. 예상했던 바와 같이 해안거리와 Cl<sup>-</sup>는 비례관계에 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 TOW는 봄철과 여름철에 습윤시간이 많고, 겨울에 적은 것을 알 수 있으며, 지역별로는 큰 변화가 없다.

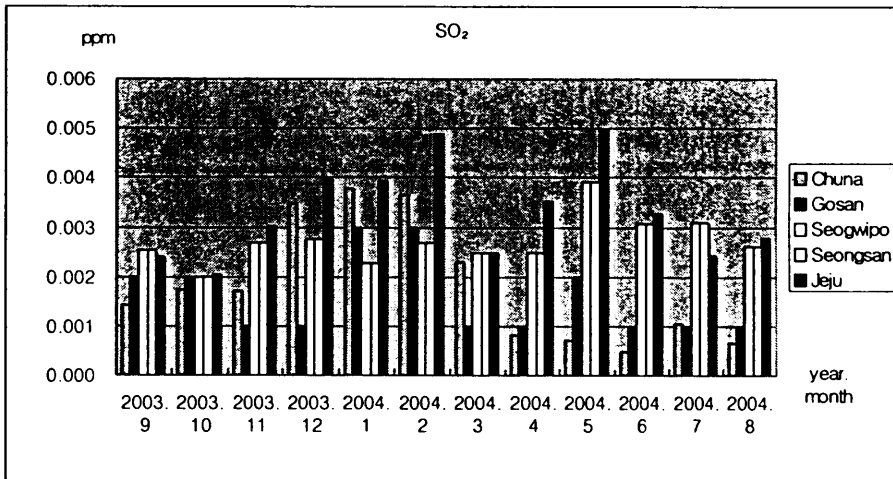


Fig. 5 Sulfur dioxide

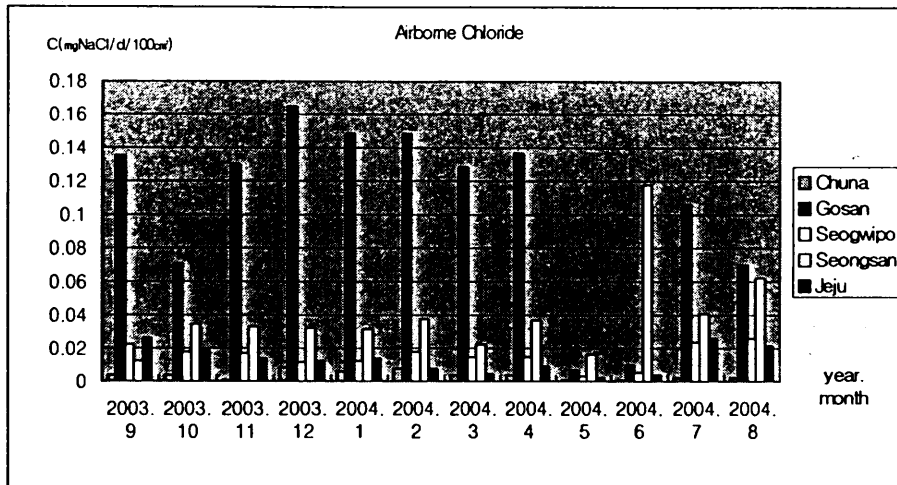


Fig. 6 Airborne chloride

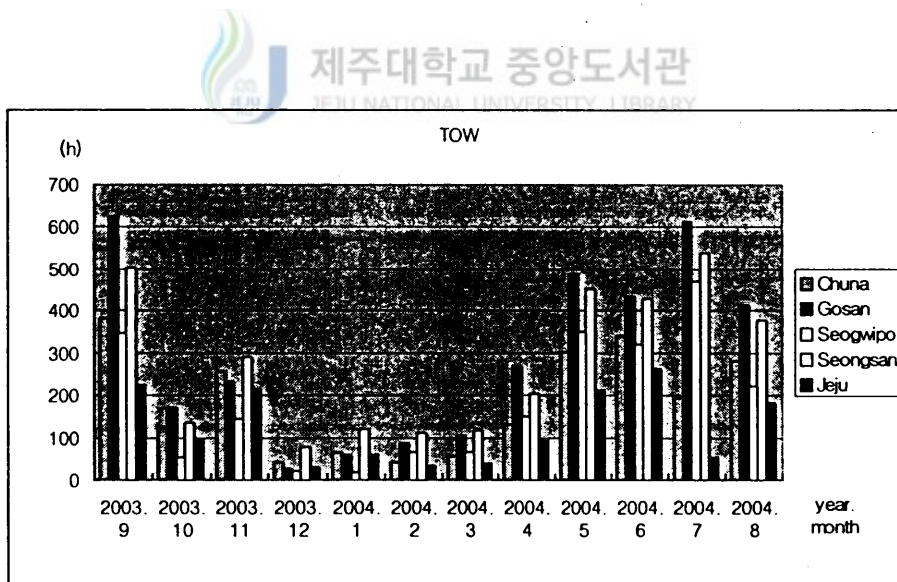


Fig. 7 Time of wetness

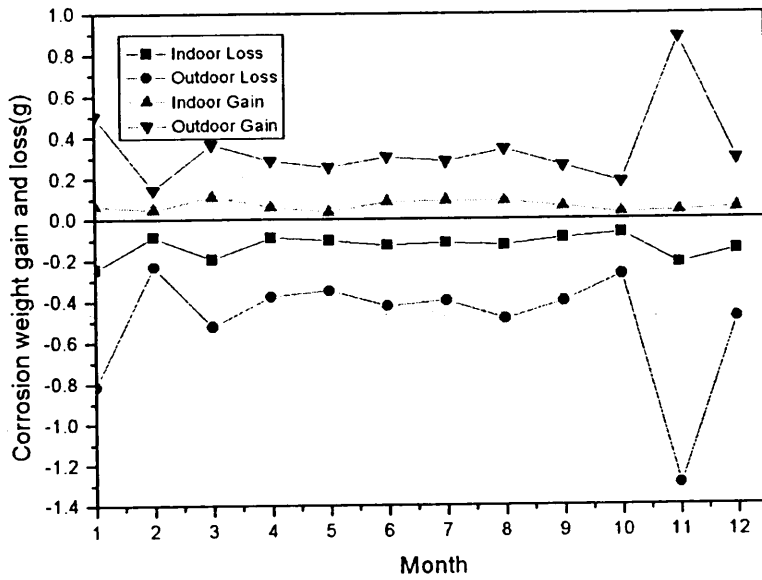
## 4.2 표준시험편의 부식량

옥내와 옥외에 폭로한 4종류의 금속시험편에 대하여 측정 장소별, 월별, 무게감소량과 무게증가량의 부식측정의 자료를 Fig. 8에 나타낸다. 무게감소량은 앞의 측정방법에서 설명한 바와 같이 노출 시험편을 수집하고 부식생성물을 제거한 후 무게를 측정한 것이고, 무게증가량은 수집 시험편의 부식생성물을 부착한 채로 무게를 측정한 값을 나타낸다. 각 금속들의 무게감소량과 무게증가량은 상관관계가 있지만 일치하지는 않는다. 무게감소량이 무게증가량보다 크게 나타나는데 이는 금속표면이 부식에 의해 산화된 무게증가량보다 부식생성물을 제거한 후 무게감소량이 크게 나타나기 때문이다.

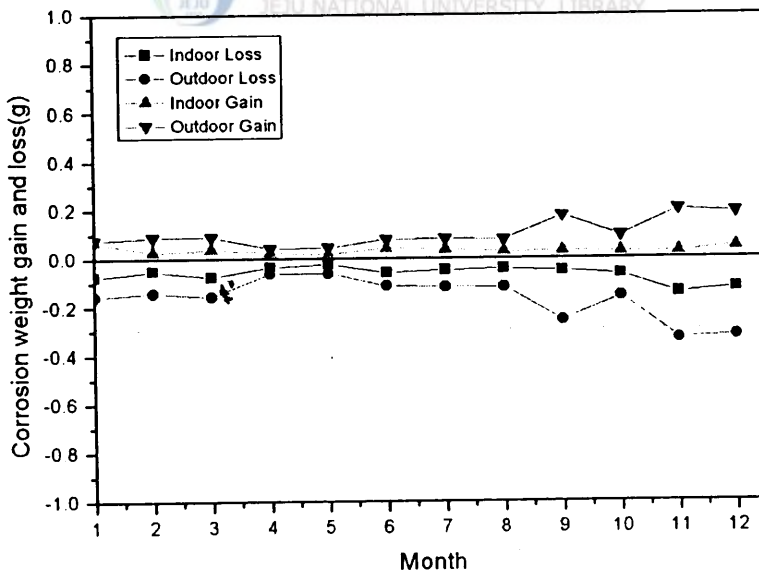
지역별로 무게 증감량을 살펴보면 고산지역이 다른 지역에 비해 큰 폭의 증감량을 나타낸다. 이것으로 위의 환경영향인자에서 염화물의 양과 황산화물의 양이 다른 지역에 비해 큰 고산지역이 부식량도 크게 나타나는 것으로 보아 염화물과 황산화물이 부식에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 다음으로는 해안가에 근접한 지역인 성산포 지역과 서귀포 지역이 증감량이 많이 나타나고, 그 다음으로 제주시청과 천아오름 순으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 지역별로의 무게 증감량을 살펴 볼 때 해안지역에 가까운 거리에 있는 지역이 부식이 많이 일어나는 것으로 보아 해염입자의 영향이 부식에 많은 영향을 준다는 것을 알 수가 있다.

계절별로는 다른 계절보다 습윤시간이 많은 여름철에 부식량이 많음을 알 수 있었고, 겨울철에는 부식량이 적은 것을 알 수 있었다. 겨울철과 여름철의 습윤시간이 많이 차이가 나는 것으로 미루어 봤을 때 재료의 부식에는 습윤시간도 많은 연관성이 있음을 알 수가 있다.

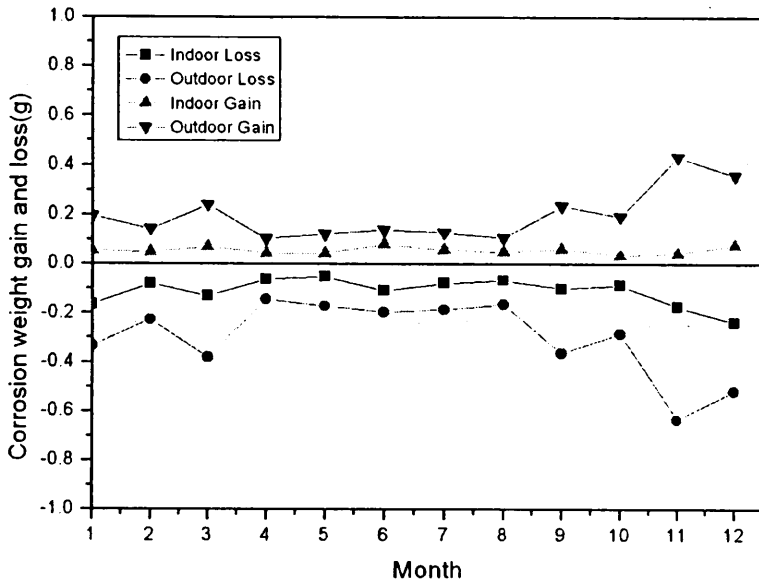
각 재료별 무게 증감량을 살펴보면 탄소강이 다른 재료들에 비해서 크게 나타나는 것을 알 수 있었고, 부식에 취약한 재료임을 알 수 있다. 다음으로는 구리가 부식량이 많았고, 아연과 알루미늄은 작은 부식량을 나타내었다.



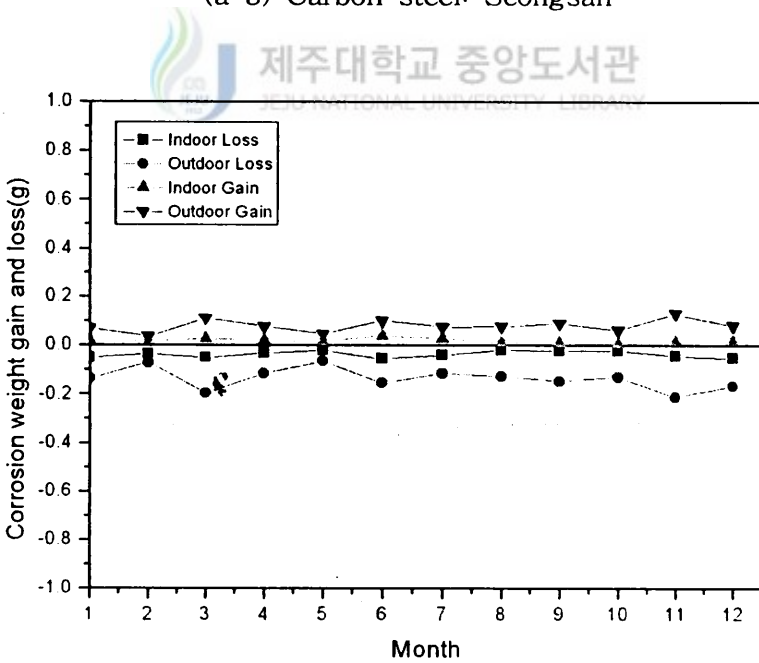
(a-1) Carbon steel: Gosan



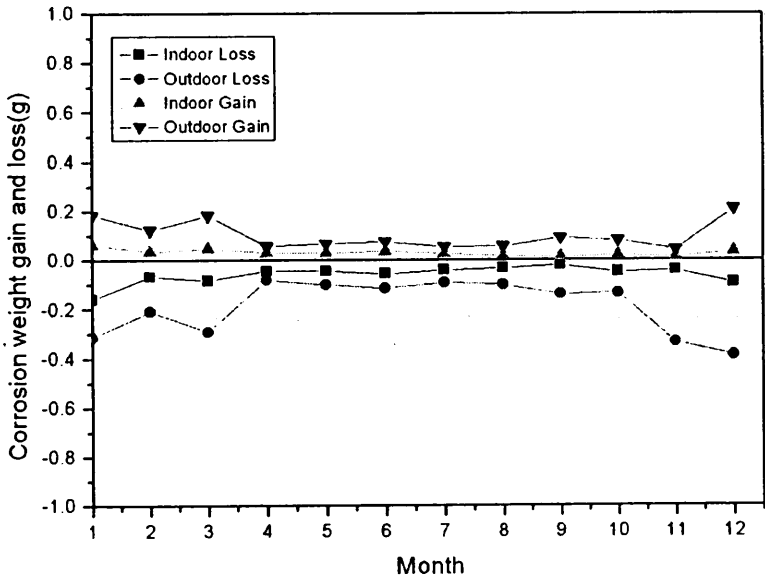
(a-2) Carbon steel: Seogwipo



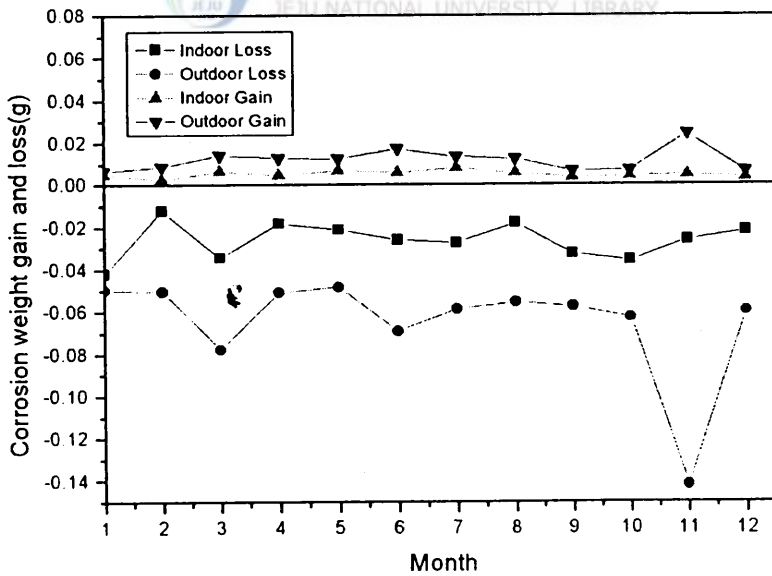
(a-3) Carbon steel: Seongsan



(a-4) Carbon steel: Chuna

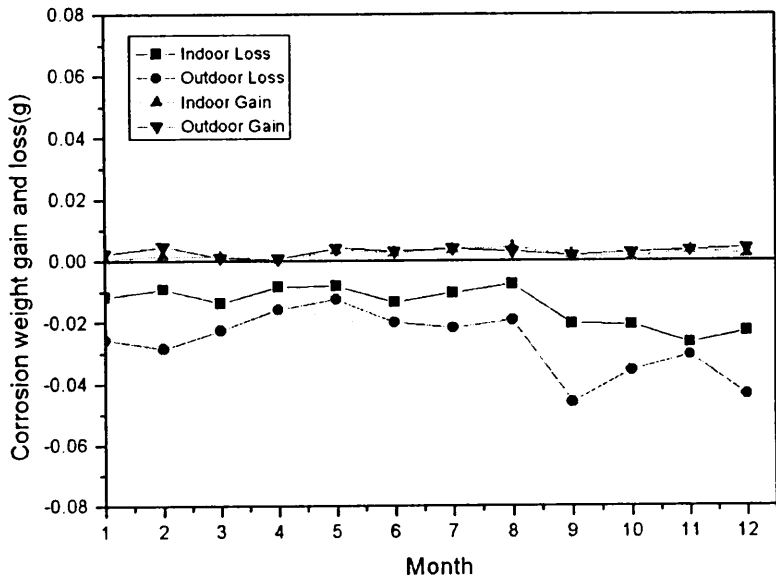


(a-5) Carbon steel: Jeju city

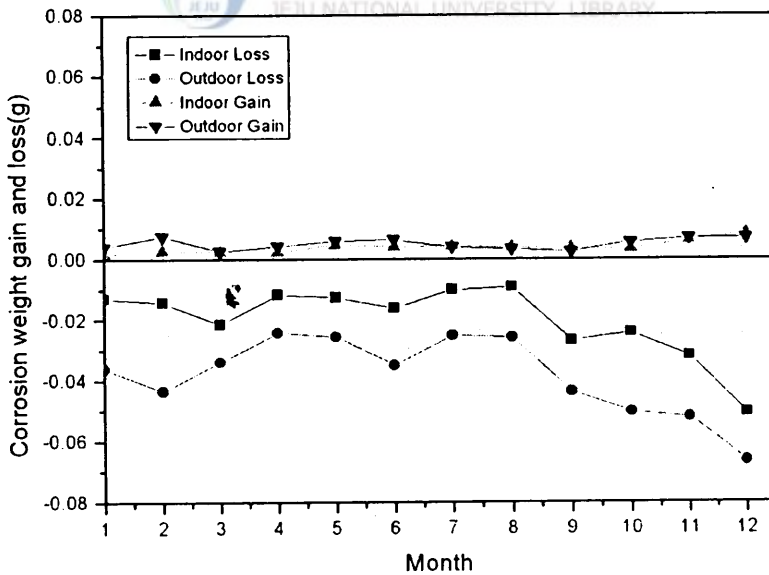


(b-1) Copper: Gosan

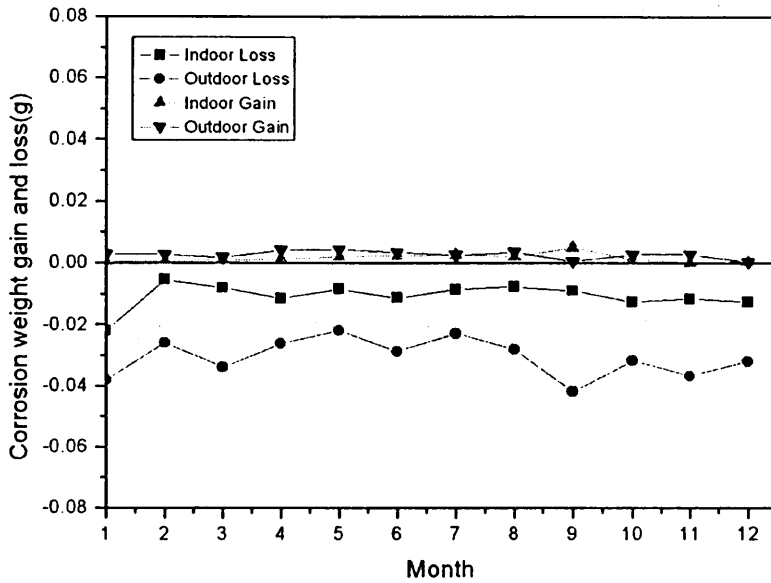




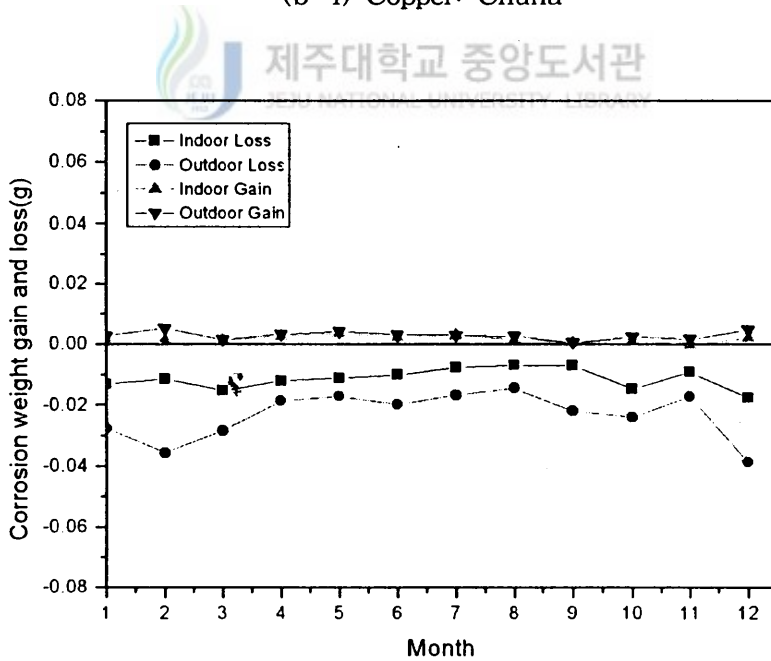
(b-2) Copper: Seogwipo



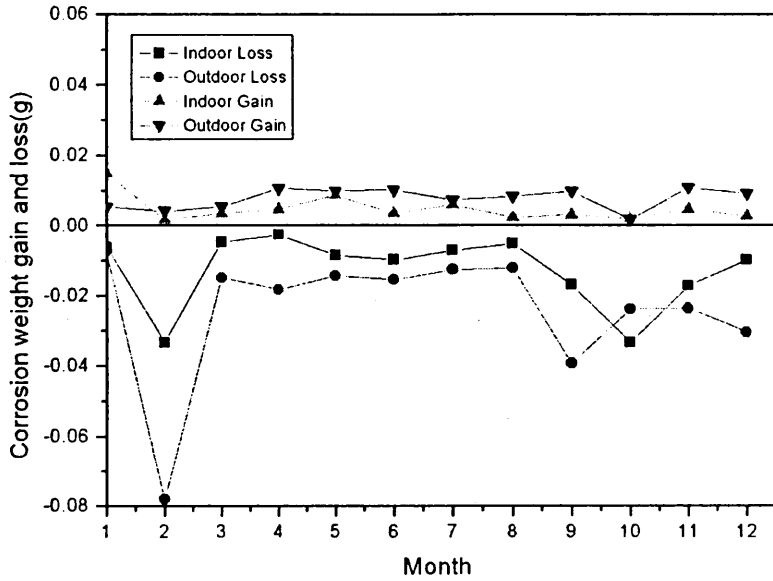
(b-3) Copper: Seongsan



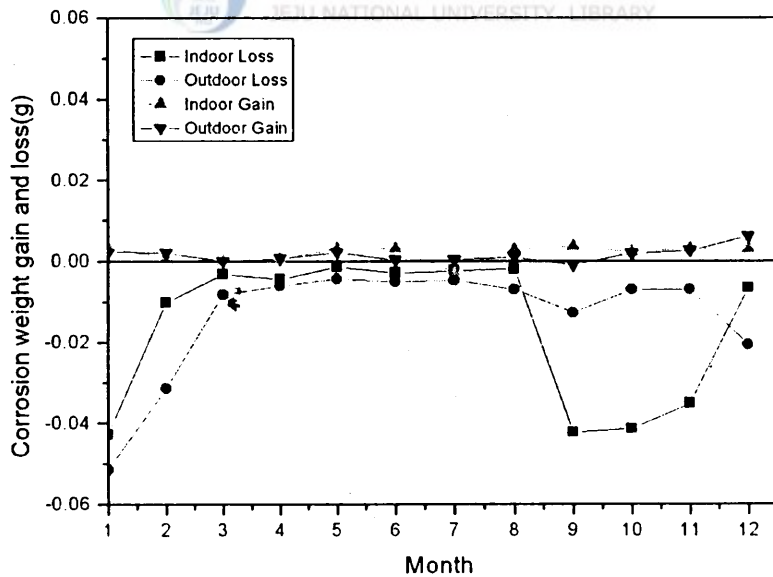
(b-4) Copper: Chuna



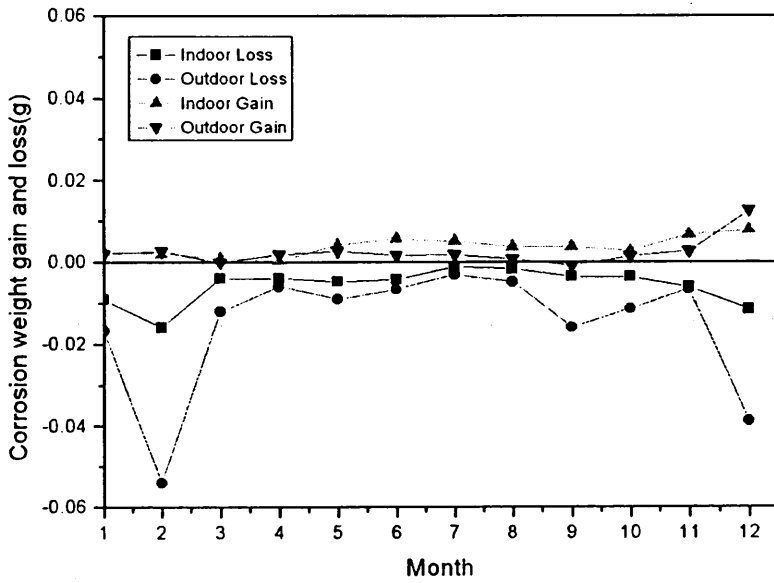
(b-5) Copper: Jeju city



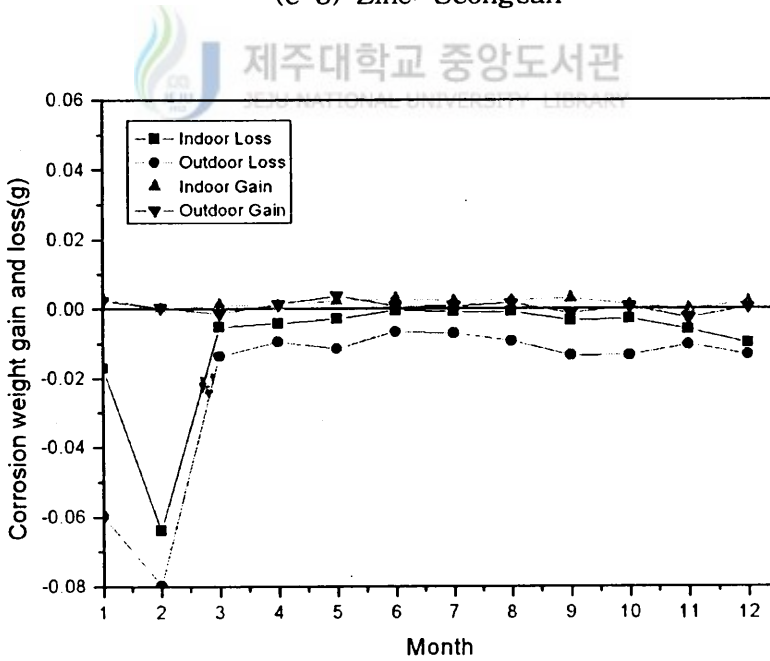
(c-1) Zinc: Gosan



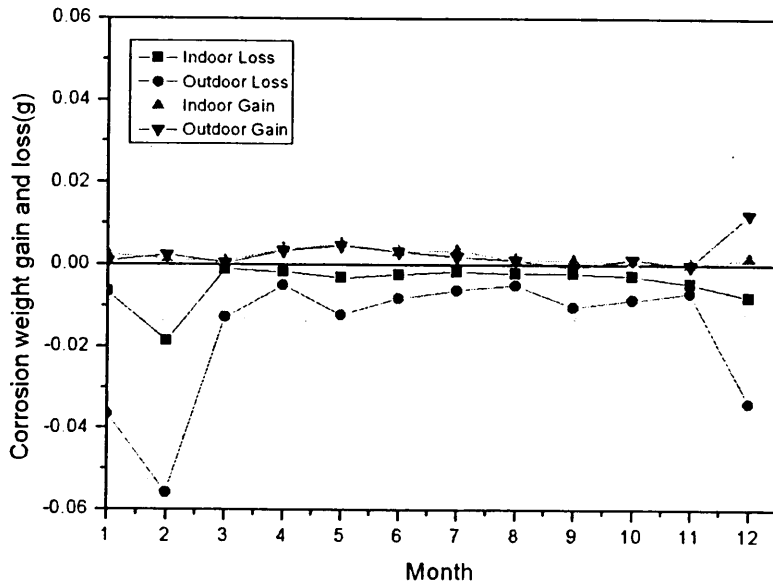
(c-2) Zinc: Seogwipo



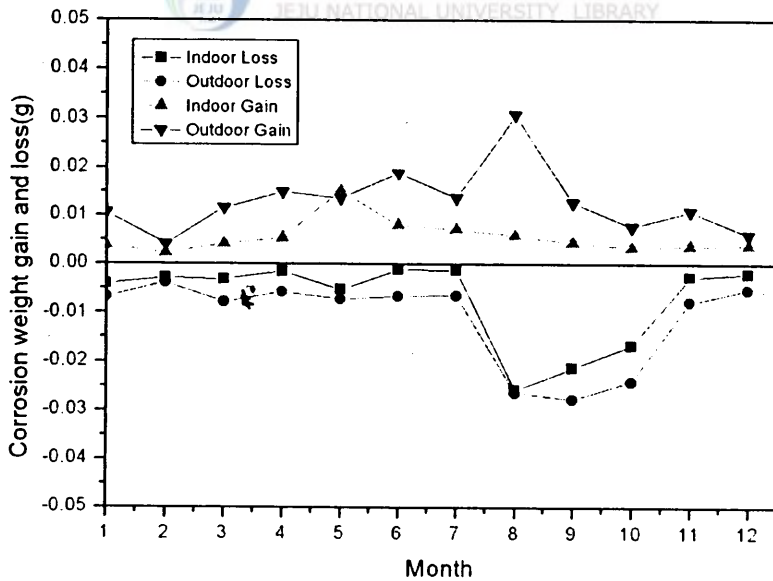
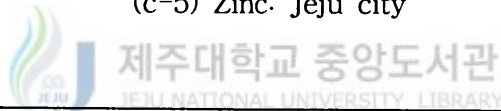
(c-3) Zinc: Seongsan



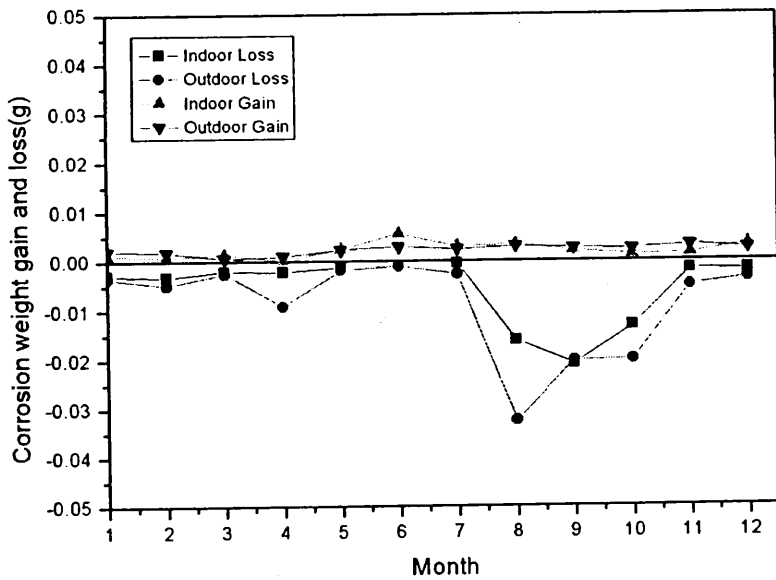
(c-4) Zinc: Chuna



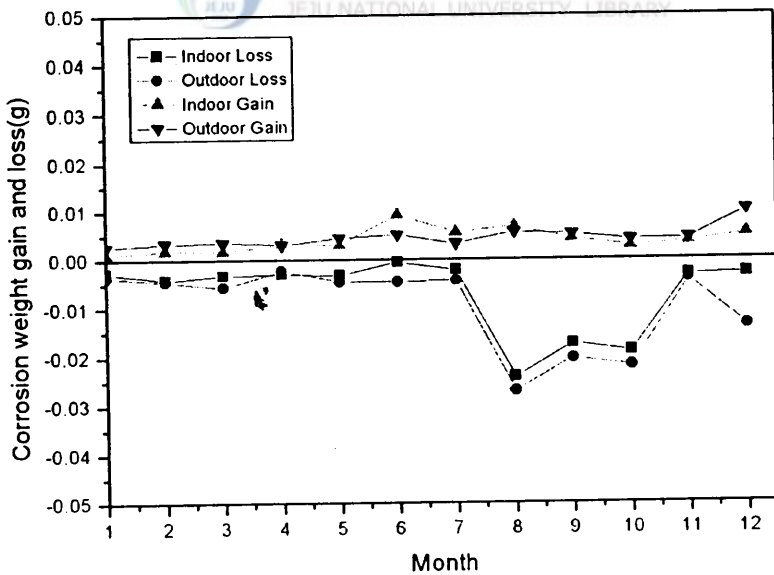
(c-5) Zinc: Jeju city



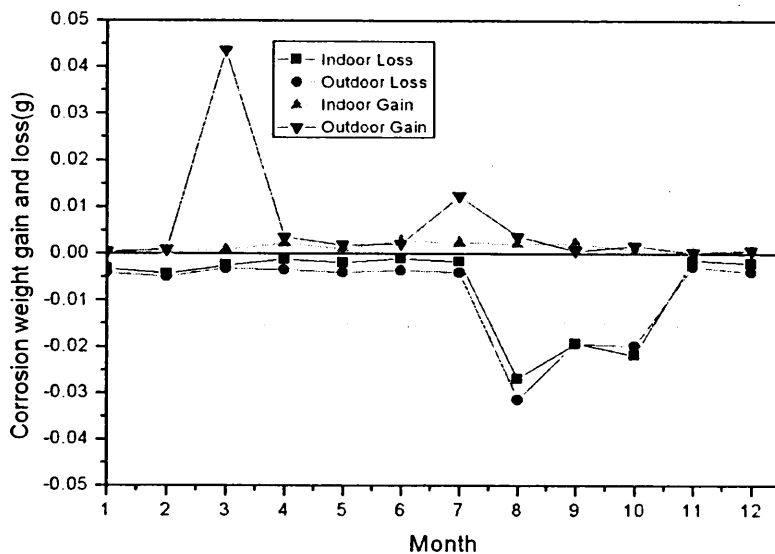
(d-1) Aluminium: Gosan



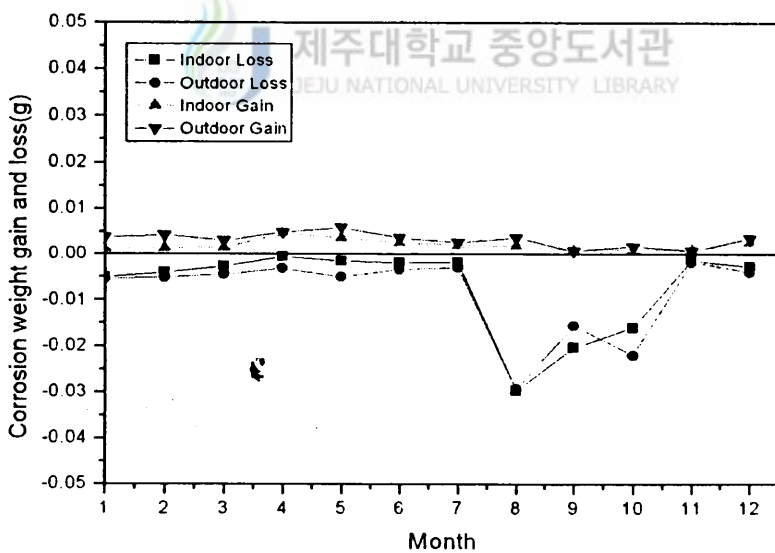
(d-2) Aluminium: Seogwipo city



(d-3) Aluminium: Seongsan



(d-4) Aluminium: Chuna



(d-5) Aluminium: Jeju city

Fig. 8 The corrosion weight gain and loss of various metal specimens in indoor and outdoor test for one year: (a)Carbon steel (b)Copper (c)Zinc (d)Aluminium

### 4.3 재료의 계절별 부식량과 3개월 단위의 부식량

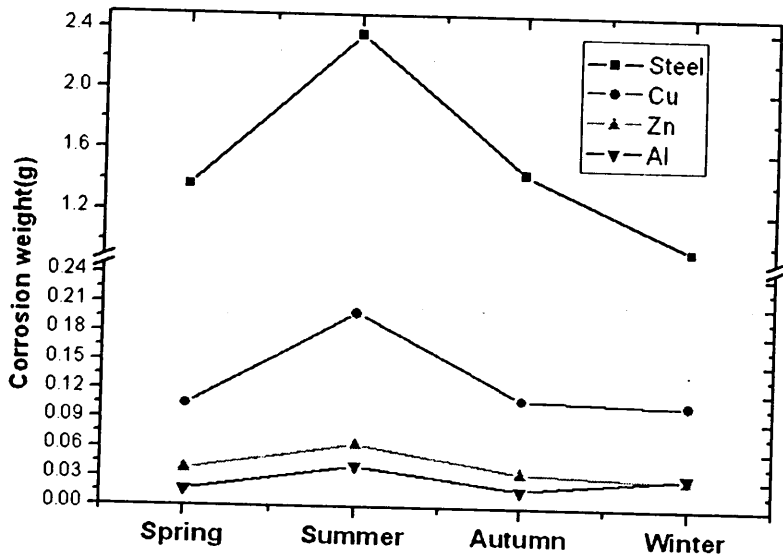
5개 측정 장소에 있어서 계절별 부식량을 Fig. 9에 나타내었다. 각 계절별로 살펴보면 여름철이 다른 계절에 비하여 부식량이 크게 나타나는 것을 알 수 있고, 봄과 가을이 비슷하게 부식량이 나타나는 것을 알 수 있다. 겨울철이 가장 적게 부식이 일어나는데 그 이유는 다른 계절에 비해 상대적으로 TOW의 값이 작게 나타나기 때문이다. TOW 값과 계절별 부식량을 비교해 보면 거의 유사하게 비례함을 알 수가 있는데 이것으로 TOW가 금속의 부식량에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 지역별로는 고산지역의 부식량이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었고, 그 다음으로 성산과 서귀포 지역이 비슷한 부식량을 나타내었다. 제주시 지역과 천아오름 지역이 가장 적은 부식량을 나타낸다.

대기환경영향 5개의 측정 장소에 있어서 각 금속별, 즉 탄소강, 구리, 아연, 알루미늄의 3개월 단위의 시험편 부식량을 Fig. 10에 나타낸다.

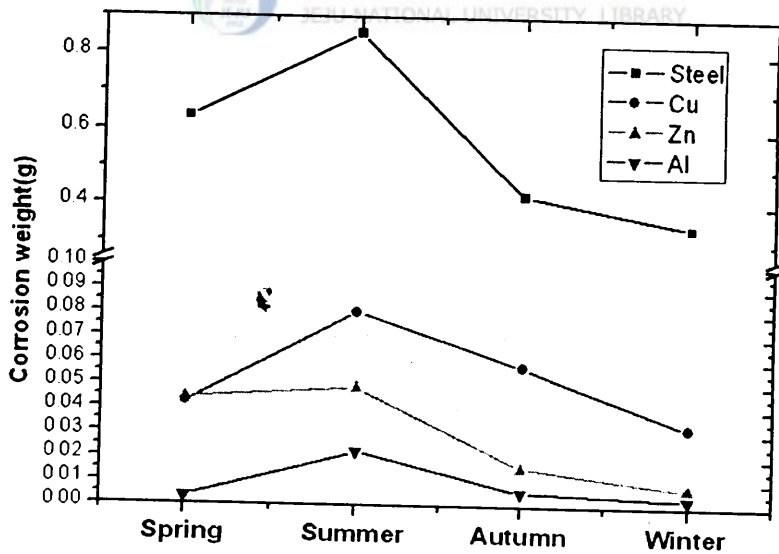
Fig. 10에 나타난 시험재료의 무게 증가량과 감소량을 살펴보면 옥외의 증감량은 옥내의 경우보다 2-3배 크다. 이 실험결과로 보아 옥내의 부식환경이 옥외의 부식 환경에 비해 덜하다는 것을 알 수 있다.

3개월 단위의 대기부식속도 자료를 이용하여 대기환경 인자에 관련하여 무게감소량을 검토하여 보면 아황산가스(SO<sub>2</sub>)의량은 전체 측정지역에서 미량이므로 대기 중 염화물(Cl<sup>-</sup>)과 TOW가 부식량에 영향이 큰 것을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 대기 중 염화물(Cl<sup>-</sup>)과 TOW는 고산, 성산, 제주시청, 서귀포, 천아오름의 순으로 작다. 각 금속에 있어서 탄소강과 구리의 옥내, 옥외의 경우 월별 부식량은 대기 환경인자의 대소와 유사한 경향을 보이거나 아연, 알루미늄은 반드시 그렇지 않다. 그 이유는 부식량이 정도가 워낙 미비하여 부식량 제거시나 다른 환경적인 곤충, 식물의 씨앗 등의 영향을 받아 부식이 일어난 것으로 보인다.

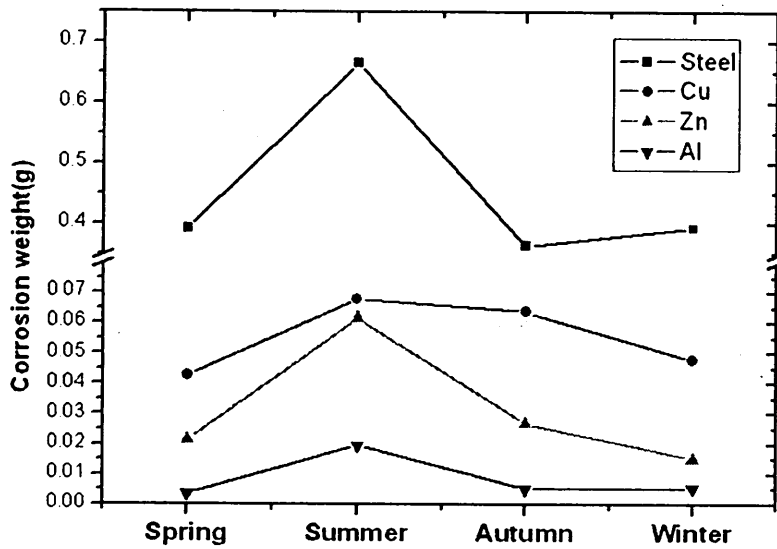




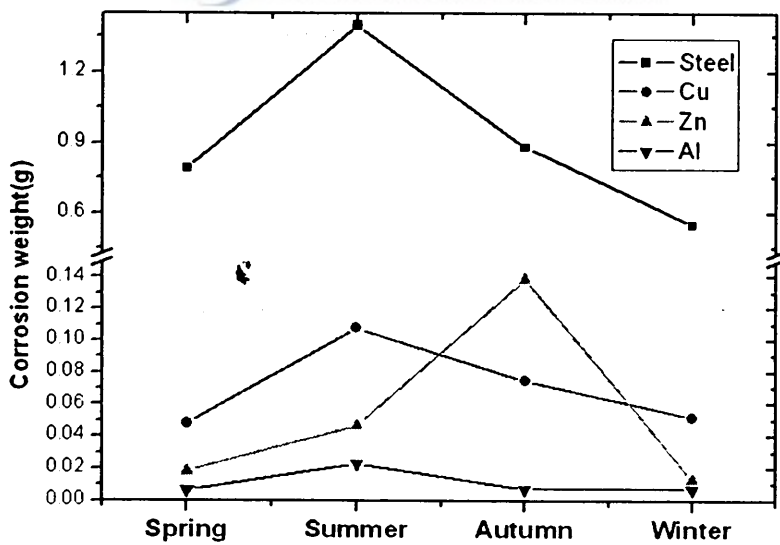
(a)Gosan



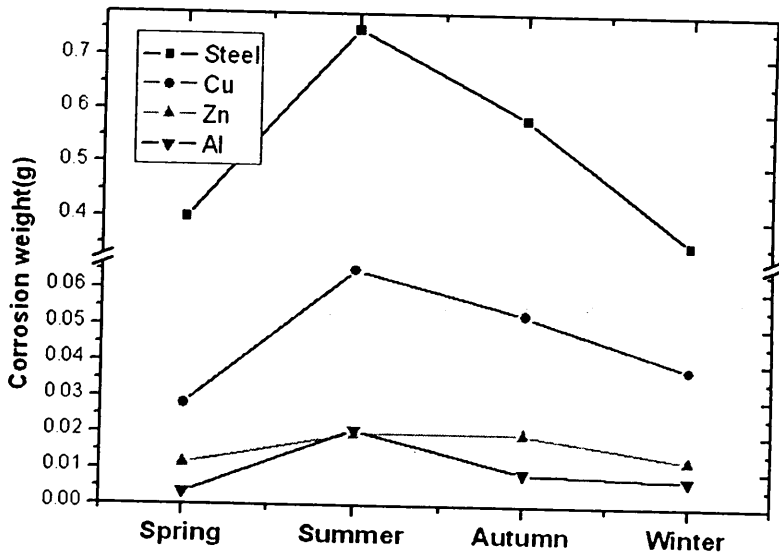
(b)Seogwipo



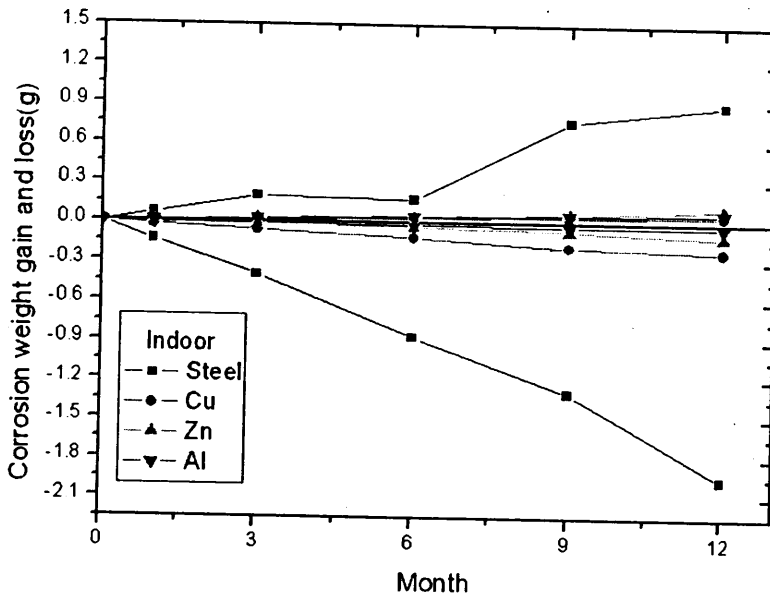
(c)Seongsan



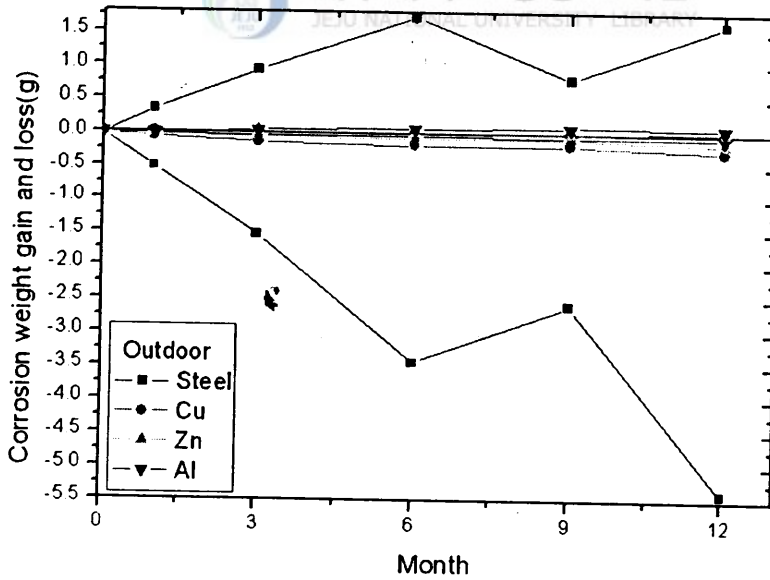
(d)Chuna



(e) Jeju City  
 Fig. 9 Seasonal corrosion weight loss

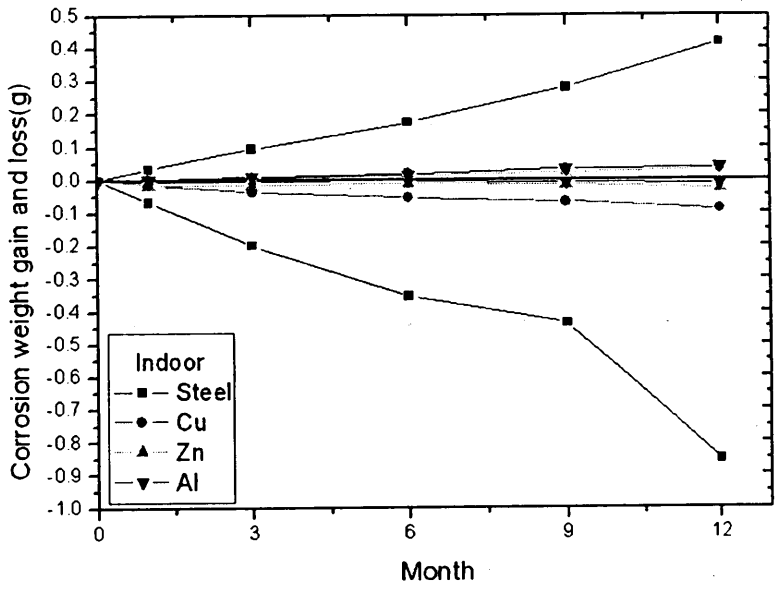


(a)Indoor

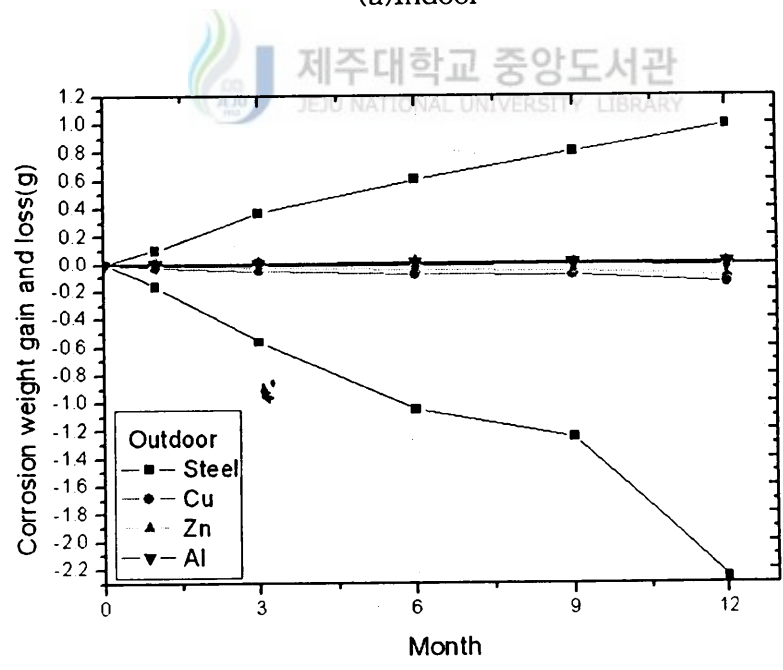


(b)Outdoor

Fig. 10 Corrosion weight loss during three monthly exposure: Gosan

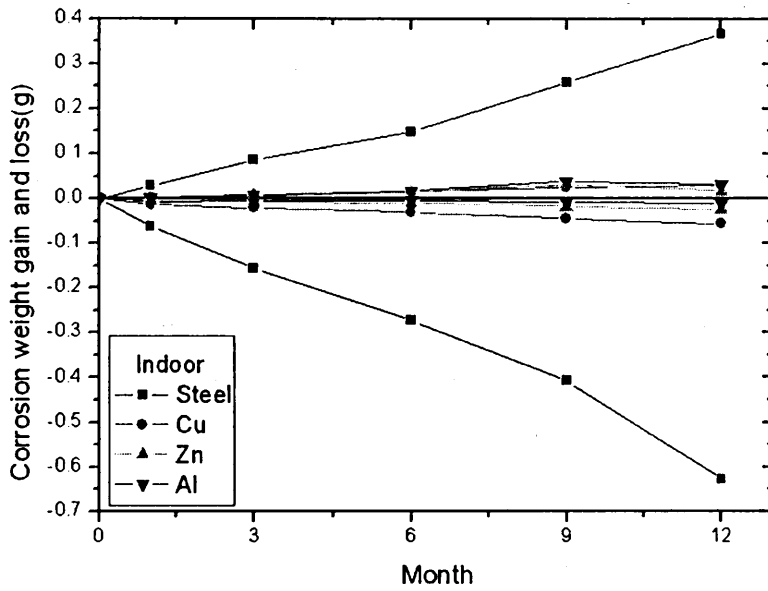


(a) Indoor

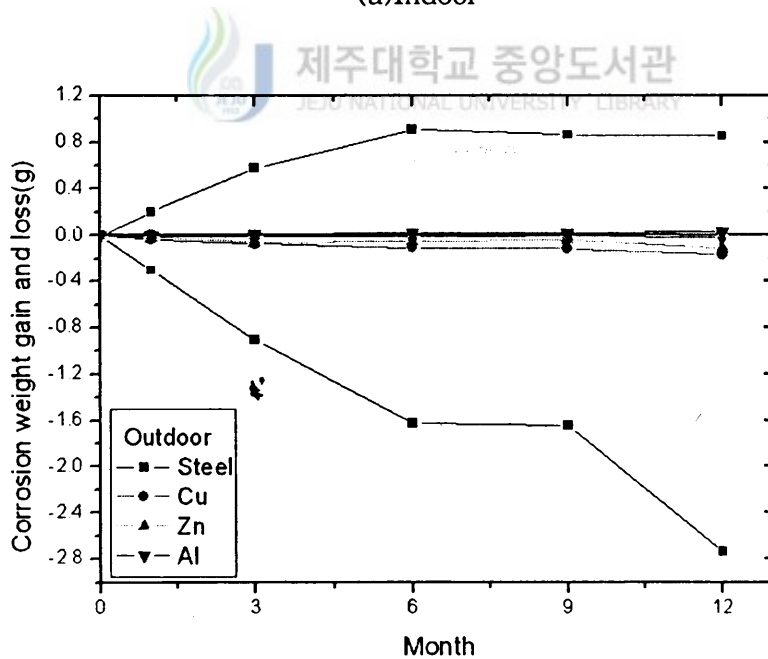


(b) Outdoor

Fig. 10 Corrosion weight loss during three monthly exposure: Seogwipo

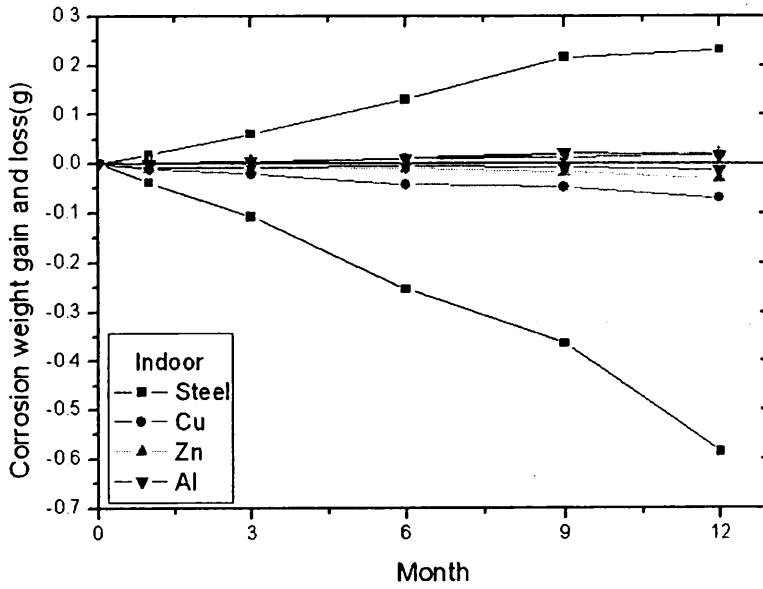


(a) Indoor

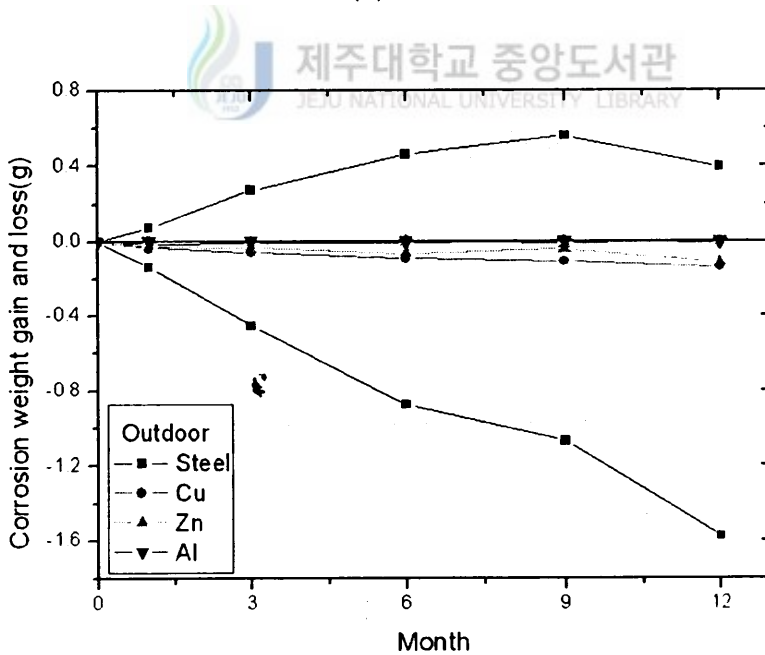


(b) Outdoor

Fig. 10 Corrosion weight loss during three monthly exposure: Seongsan

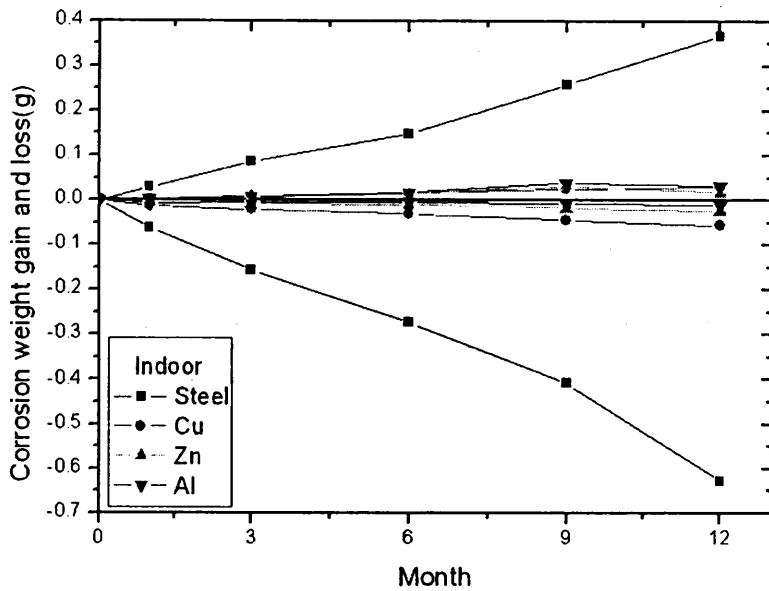


(a)Indoor

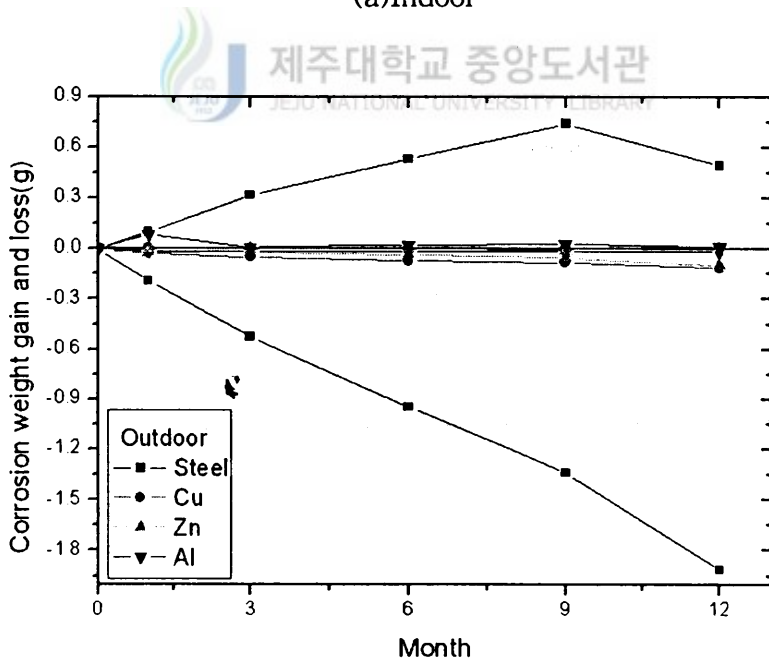


(b)Outdoor

Fig. 10 Corrosion weight loss during three monthly exposure: China



(a) Indoor



(b) Outdoor

Fig. 10 Corrosion weight loss during three monthly exposure: Jeju City



#### 4.4 대기환경의 부식등급과 실험재료의 무게감량 부식등급

대기환경의 영향인자에 대한 부식등급은 Table 3과 Table 4에서 제시한 방법에 의해 실제 실험에서 측정된 값을 대입하여 대기환경 등급을 Table 9에 나타낸다. Table 9에서 TOW등급은 Site 전체에서 T3, T4로 습윤시간이 크게 나타난다. 여기서 T값이 전체적으로 큰 등급을 나타내는 것은 제주도의 5개 지역이 섬지역의 기후 특색으로 인하여 습윤시간이 많은 것을 의미한다.

Cl-등급에서 천아오름은 산간 지방에 위치하고 있어 S1값을 나타내었고, 고산과 성산포가 각각 최고 등급인 S3의 등급을 나타내었다. 또 서귀포와 제주시가 S2등급으로 그다음 등급을 나타내었다. 이것으로 보아 해안가 지역에서 3km이내에 근접한 지역에서는 해염입자의 영향으로 인하여 Cl-등급이 높게 나타나는 것을 알 수가 있으며, 산간지역에 위치한 천아오름은 해염입자의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

SO<sub>2</sub>의 등급은 전 지역에서 P0의 값으로 나타난다. 조사된 전체 제주지역의 아황산가스의 농도는 매우 적은 값을 나타내었는데, 이것으로 제주지역의 대기오염은 다른 공업도시들과는 다르게 아주 청정한 지역임을 알 수 있다.

Table 9의 대기환경의 부식등급을 종합해 보면 제주지역은 섬 지역의 특색인 해염입자와 습윤시간의 등급이 매우 높은 반면 아황산가스가 거의 없는 청정지역이라 할 수 있다.

대기 환경인자에 의해 평가된 부식등급과 표준패널 방법에 의한 부식등급을 Table 10에 나타낸다. 여기에서 대기환경에 의한 평가등급은 Table 5에서 언급한 대기환경영향 인자에 따른 각 재료별 부식등급을 부여하고 그것을 A.C로 나타낸 것이다. 재료별 부식량 측정에 의한 부식등급은 Table 7의 등급화 방법을 통하여 실내(indoor), 실외(outdoor)로 나누어 M.C로 나타내었다. Table 10을 살펴보면 지역별로는 고산지역이

C5등급이 가장 많아 부식이 아주 크게 나타나는 지역임을 알 수가 있고 성산포가 다음으로 부식이 잘되는 지역임을 알 수 있다. 서귀포와 제주 시, 천아오름 지역은 비슷한 부식등급을 나타내었고, 재료별로는 탄소강, 구리, 아연, 알루미늄 순으로 부식이 됨을 알 수 있다.

대기환경의 영향인자에 대한 부식등급(A.C)과 부식감량에 의한 부식등급(M.C)을 비교하면 대체로 비슷한 일치를 보여 대기환경의 실험 데이터와 재료의 부식 데이터의 타당성을 입증해 주고 있다. 지역에 따른 비교를 하면 해안에서의 거리가 가장 근접한 고산인 경우 실외의 부식감량에 의한 부식등급(M.C)이 대기환경의 영향인자에 대한 부식등급(A.C)과 많은 일치를 보이고, 다른 지역에서는 실내와 실외의 중간 정도의 등급이 일치함을 알 수 있다. 이것은 해안가에 가장 근접한 고산지역의 경우 염화물의 수치가 가장 높은 지역이므로 나타나는 현상임을 알 수 있다.

제주지역과 유사한 지형을 가진 지역의 MICAT project에서 조사된 3 Caribbean 국가들 즉, Cuba, Mexico, Venezuela에서의 탄소강에 대한 대기부식의 예를 Table 11과 Table 12에 나타낸다. 해안에서 거리가 가까운 해안지역의 부식등급이 크며 전원지역 및 도시지역의 부식등급은 작다. 부식등급은 전체 조사지역의 SO<sub>2</sub>의 등급은 모두 작으므로 주로 염분등급이 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있는데, 이 지역들의 해안가 지역에 환경영향인자의 등급과 대기부식등급을 살펴보면 제주의 해안가 지역의 부식등급과 유사함을 알 수가 있다.[15,16]

Table 9 Classes of TOW, sulfur dioxide and chloride

	TOW		SO <sub>2</sub>		Cl	
	hour/year	Class	mg/m <sup>2</sup> /day	Class	mg/m <sup>2</sup> /day	Class
Gosan	3526	T4	0.2	P0	1046	S3
Seogwipo	2231	T3	0.3	P0	154	S2
Seongsan	3356	T4	0.3	P0	398	S3
Chuna	2228	T3	0.2	P0	37.21	S1
Jeju	1509	T3	0.3	P0	132.98	S2



Table 10 Classes of corrosivity

	Carbon Steel (g/year/m <sup>2</sup> )			Cu (g/year/m <sup>2</sup> )			Zn (g/year/m <sup>2</sup> )			Al (g/year/m <sup>2</sup> )		
	A.C	M.C (g/year/m <sup>2</sup> )		A.C	M.C (g/year/m <sup>2</sup> )		A.C	M.C (g/year/m <sup>2</sup> )		A.C	M.C (g/year/m <sup>2</sup> )	
		in door	out door		in door	out door		in door	out door		in door	out door
Gosan	C5	C3	C5	C5	C5	C5	C5	C4	C4	C5	C5	C5
Seogwipo	C3C4	C3	C4	C3	C4	C5	C3	C3	C4	C3C4	C4	C4
Seongsan	C5	C3	C4	C5	C5	C5	C5	C3	C4	C5	C4	C4
Chuna	C2C3	C2	C3	C3	C4	C5	C3	C3	C4	C3	C3	C3
Jeju	C3C4	C2	C3	C3	C3	C4	C3	C3	C4	C3C4	C4	C4

Table 11 ISO 9223 corrosion classes of Caribbean areas for one year

State	Place	Area characteristic	Seashore distance (km)	Corrosion rate ( $\mu\text{m}/\text{year}$ )	Corrosion Class
Cuba	Viriato	North coastal	0.01	513.8	>C5
	Via Blanca	Industrial-coastal	2	42.1	C3
	Quivicán	Rural	30	29.0	C3
Mexico	Puerto Progreso	North coastal	0.05	362.4	>C5
	Puerto Morelos	South coastal	0.20	91.3	C5
	Merida	Urban-rural	30	25.2	C3
Venezuela	La Voz	North coastal	0.15	864.0	>C5
	Adicora 1	North coastal	0.05	650.6	>C5
	Adicora 2	North coastal	0.3	87.0	C5
	Punto Fijo	Coastal-urban	0.2	39.1	C3
	Coro	Urban	5	3.4	C2
	Maracaibo	Urban-rural	20	21.9	C2
	El Tablazo	Industrial-rural	2	29.3	C3

Table 12 ISO 9223 atmospheric environment classes of Caribbean areas for one year

State	Place	Chloride ( $\text{mgCl}^-/\text{m}^2 \text{d}$ )	Chloride Class	SO <sub>2</sub> ( $\text{mgSO}_2/\text{m}^2 \text{d}$ )	SO <sub>2</sub> Class
Cuba	Viriato	919.3	S3	42.4	P2
	Via Blanca	40.5	S1	29.1	P1
	Quivicán	15.7	S1	16.1	P1
Mexico	Puerto Progreso	470.8	S3	12.8	P1
	Puerto Morelos	243.9	S2	4.5	P0
	Merida	10.0	S1	3.9	P0
Venezuela	La Voz	567.7	S3	9.5	P0
	Adicora 1	254.5	S2	8.5	P0
	Adicora 2	82.1	S2	6.6	P0
	Punto Fijo	26.2	S1	8.9	P0
	Coro	26.7	S1	6.7	P0
	Maracaibo	63.3	S2	6.8	P0
	El Tablazo	27.2	S1	6.2	P0

#### 4.5 대기부식 영향 인자의 다중회귀분석

각 지역별 대기환경 영향 인자와 재료의 부식감량과의 관계를 조사하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석에 사용한 프로그램은 SPSS 10.0을 사용하였고, 대기환경 영향 인자와 부식감량의 관계는 선형 모델이라고 가정하고 그 식은 다음과 같이 나타난다.

$$C = a + B_1(\text{Cl}^-) + B_2(\text{SO}_2) + B_3(\text{TOW}) \quad [4-1]$$

위 식에서 C는 부식량을 나타내며, a와 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>는 각 환경영향인자에 관련된 계수이다. 이 분석에서 종속변수의 값은 각 재료별 부식감량으로 선정하였고, 독립변수의 값을 염화물, 황산화물, TOW값으로 하여 분석한 자료를 Table 9에 나타내었다. Table 9에서는 분석한 회귀분석 자료를 바탕으로 각 재료에 따른 지역별 부식량을 나타내었고, 여기서 R은 다중상관계수를 나타낸 것이다. [17]

각 지역별, 재료별로 회귀분석을 실시한 결과 다소 지역과 재료에 따라 차이는 있지만 다중 상관계수(R)의 값을 살펴보면 대기환경영향인자로 선택한 3가지의 인자들이 부식에 많은 영향을 주고 있는 것을 알 수가 있다. 특히 탄소강의 경우 다중상관계수가 천아오름 지역을 제외하면 매우 높은 수치를 나타내는 것을 알 수 있는데, 이것은 강의 부식감량이 다른 재료에 비하여 매우 높게 나타나며 각 환경영향 인자에 따른 상관관계가 분명하게 나타나기 때문이다. 다른 재료의 경우에도 상관계수가 거의 비슷한 수준으로 나오고 있지만 아연의 경우 상관계수가 적은 이유는 황산화물의 아주 미세한 값이었고 그에 따른 부식감량이 크지가 않았기 때문이다. 지역별로는 별다른 큰 차이를 보이고 있지는 않지만 천아오름 지역에서 몇몇 큰 차이를 보이는 자료는 월별의 적은 노출기간으로 인해 부식 제거를 하는 과정에서 모재의 손상과 곤충의 작은 배설물들과

산림지역 환경으로 인한 특수성 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

Table 13 Regression analysis for Carbon Steel

Site	indoor/ outdoor	Corrosion rate Equation	R
Gosan	indoor	$C_S = -3.1 \times 10^{-2} + 0.878(\text{Cl}^-) - 0.393(\text{SO}_2) + 2.581 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.916
	outdoor	$C_S = -0.231 + 3.748(\text{Cl}^-) - 27.334(\text{SO}_2) + 1.316 \times 10^{-3}(\text{TOW})$	0.881
Seogwipo	indoor	$C_S = -4.21 \times 10^{-2} + 2.553(\text{Cl}^-) + 22.537(\text{SO}_2) + 6.667 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.839
	outdoor	$C_S = -0.307 + 7.818(\text{Cl}^-) - 115.888(\text{SO}_2) - 1.9 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.757
Seongsan	indoor	$C_S = 9.421 \times 10^{-2} - 9.7 \times 10^{-2}(\text{Cl}^-) - 16.136(\text{SO}_2) + 2.412 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.665
	outdoor	$C_S = 9.794 \times 10^{-2} - 0.171(\text{Cl}^-) + 3.859(\text{SO}_2) + 7.153 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.803
Jeju	indoor	$C_S = 7.402 \times 10^{-3} + 2.796(\text{Cl}^-) - 2.003(\text{SO}_2) + 1.903 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.788
	outdoor	$C_S = -8.1 \times 10^{-3} + 10.335(\text{Cl}^-) - 1.653(\text{SO}_2) + 5.449 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.897
Chuna	indoor	$C_S = 1.529 \times 10^{-2} + 0.409(\text{Cl}^-) - 5.439(\text{SO}_2) + 5.898 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.361
	outdoor	$C_S = 0.142 - 4.162(\text{Cl}^-) - 1.483(\text{SO}_2) + 6.615 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.444

Table 13 Regression analysis for Cu

Site	indoor/ outdoor	Prediction Equation	R
Gosan	indoor	$C_{Cu} = 1.534 \times 10^{-2} + 1.379 \times 10^{-2} (Cl^-) - 1.244 (SO_2) + 2.602 \times 10^{-5} (TOW)$	0.593
	outdoor	$C_{Cu} = 4.254 \times 10^{-2} + 0.134 (Cl^-) - 6.312 (SO_2) + 6.305 \times 10^{-5} (TOW)$	0.529
Seogwipo	indoor	$C_{Cu} = -7.9 \times 10^{-3} + 0.121 (Cl^-) - 6.13 (SO_2) + 1.895 \times 10^{-5} (TOW)$	0.895
	outdoor	$C_{Cu} = -1.3 \times 10^{-2} + 0.166 (Cl^-) + 12.742 (SO_2) + 1.639 \times 10^{-5} (TOW)$	0.765
Seongsan	indoor	$C_{Cu} = -1.2 \times 10^{-2} + 0.120 (Cl^-) - 7.825 (SO_2) + 2.280 \times 10^{-5} (TOW)$	0.688
	outdoor	$C_{Cu} = 1.548 \times 10^{-2} + 0.182 (Cl^-) - 1.588 (SO_2) + 4.102 \times 10^{-5} (TOW)$	0.754
Jeju	indoor	$C_{Cu} = 6.414 \times 10^{-3} + 0.165 (Cl^-) - 8.205 \times 10^{-2} (SO_2) + 1.995 \times 10^{-5} (TOW)$	0.635
	outdoor	$C_{Cu} = 1.804 \times 10^{-2} + 0.288 (Cl^-) - 1.257 (SO_2) + 4.524 \times 10^{-5} (TOW)$	0.665
Chuna	indoor	$C_{Cu} = -4.3 \times 10^{-3} + 1.775 (Cl^-) - 3.7 \times 10^{-2} (SO_2) + 4.594 \times 10^{-5} (TOW)$	0.893
	outdoor	$C_{Cu} = 2.382 \times 10^{-2} + 0.266 (Cl^-) - 0.711 (SO_2) + 3.874 \times 10^{-5} (TOW)$	0.803

Table 13 Regression analysis for Zn

Site	indoor/ outdoor	Prediction Equation	R
Gosan	indoor	$C_{Zn} = 2.984 \times 10^{-2} - 0.166(\text{Cl}^-) - 1.640(\text{SO}_2) - 7.3 \times 10^{-6}(\text{TOW})$	0.776
	outdoor	$C_{Zn} = 5.582 \times 10^{-2} - 0.261(\text{Cl}^-) - 2.872(\text{SO}_2) - 3.0 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.636
Seogwipo	indoor	$C_{Zn} = 1.493 \times 10^{-2} - 0.503(\text{Cl}^-) - 5.353(\text{SO}_2) + 1.230 \times 10^{-4}(\text{TOW})$	0.892
	outdoor	$C_{Zn} = 2.927 \times 10^{-2} + 0.595(\text{Cl}^-) - 11.168(\text{SO}_2) + 3.791 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.633
Seongsan	indoor	$C_{Zn} = 1.728 \times 10^{-2} - 1.6 \times 10^{-3}(\text{Cl}^-) - 5.429(\text{SO}_2) + 1.268 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.500
	outdoor	$C_{Zn} = 4.028 \times 10^{-2} + 4.758 \times 10^{-2}(\text{Cl}^-) - 12.119(\text{SO}_2) + 2.355 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.315
Jeju	indoor	$C_{Zn} = 9.707 \times 10^{-3} - 0.133(\text{Cl}^-) - 2.055(\text{SO}_2) - 4.5 \times 10^{-7}(\text{TOW})$	0.574
	outdoor	$C_{Zn} = -3.5 \times 10^{-3} + 4.548(\text{Cl}^-) - 4.532(\text{SO}_2) + 8.215 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.344
Chuna	indoor	$C_{Zn} = 1.646 \times 10^{-2} + 1.103(\text{Cl}^-) - 4.529(\text{SO}_2) - 1.3 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.149
	outdoor	$C_{Zn} = -3.5 \times 10^{-3} + 4.605(\text{Cl}^-) - 4.688(\text{SO}_2) + 8.375 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.354



Table 13 Regression analysis for Al

Site	indoor/ outdoor	Prediction Equation	R
Gosan	indoor	$C_{Al} = 1.529 \times 10^{-2} - 7.1 \times 10^{-2}(\text{Cl}^-) - 0.598(\text{SO}_2) + 1.613 \times 10^{-6}(\text{TOW})$	0.470
	outdoor	$C_{Al} = 2.163 \times 10^{-2} - 8.9 \times 10^{-2}(\text{Cl}^-) - 0.874(\text{SO}_2) + 1.344 \times 10^{-6}(\text{TOW})$	0.562
Seogwipo	indoor	$C_{Al} = 5.852 \times 10^{-3} - 0.523(\text{Cl}^-) + 0.697(\text{SO}_2) + 2.587 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.756
	outdoor	$C_{Al} = 2.297 \times 10^{-2} - 0.747(\text{Cl}^-) - 3.841(\text{SO}_2) + 3.619 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.614
Seongsan	indoor	$C_{Al} = 1.1 \times 10^{-2} + 8.859 \times 10^{-2}(\text{Cl}^-) + 5.495(\text{SO}_2) - 1.5 \times 10^{-6}(\text{TOW})$	0.468
	outdoor	$C_{Al} = -1.4 \times 10^{-2} + 0.12(\text{Cl}^-) + 7.067(\text{SO}_2) - 1.9 \times 10^{-6}(\text{TOW})$	0.575
Jeju	indoor	$C_{Al} = 6.904 \times 10^{-3} - 0.474(\text{Cl}^-) + 0.550(\text{SO}_2) + 3.925 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.586
	outdoor	$C_{Al} = 1.215 \times 10^{-2} - 0.532(\text{Cl}^-) - 0.350(\text{SO}_2) + 3.70 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.609
Chuna	indoor	$C_{Al} = 2.308 \times 10^{-2} + 1.116(\text{Cl}^-) - 8.676(\text{SO}_2) - 2.1 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.668
	outdoor	$C_{Al} = 2.606 \times 10^{-2} + 1.604(\text{Cl}^-) - 9.694(\text{SO}_2) - 2.9 \times 10^{-5}(\text{TOW})$	0.667

## 4.6 표준 금속재료의 부식 기구

### 4.6.1 탄소강

탄소강의 대기부식은 지역에 의존한다. 즉, 전원지역의 대기에서의 부식생성물은 산화물 또는 탄화물 형태이다. 공업지역의 대기에는 황산이 존재하며, 해안지역의 대기에는 염이 존재한다. 따라서 부식은 공업지역에서 산이 존재함에 따라 빨리 진행하며, 도심과 해안지역에서 수용성의 황산염이나 염소이온과 같은 이온의 존재로 인하여 보호막이 제거되므로 더욱 빨리 진행한다.

부식의 초기단계에서는 금속표면에서 전해질이 존재하면 부식진행이 가능하고, SO<sub>2</sub>가 수착(sorption)되면 황산염 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>을 형성하며 산화되면서 가속된다.

염화물이 존재하는 환경에서 강의 부식은 초기에 염화물 입자가 형성되면 국부적으로 농도가 높은 염소이온 용액이 FeOOH의 부동태 피막을 파괴시킨다. 양극지역에서 염소이온들이 집중하게 되고 반면에 녹으로 덮인 주위부분은 음극으로 작용하게 된다.

양극은 산화환원전위가 낮고, pH가 낮은 지역이 된다. 이러한 상태는 전위-pH 도에서 Fe<sup>2+</sup> 영역 내에 있는 상태에 해당되어 강 표면에서 국부적인 부식이 진행하고 주변은 음극으로 작용하게 된다.

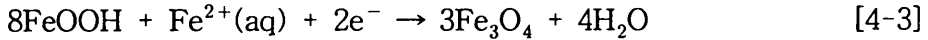
음극반응은 전해질 내에 용해된 산소의 환원반응이다.



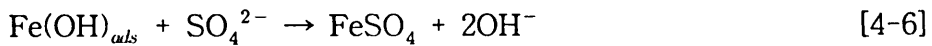
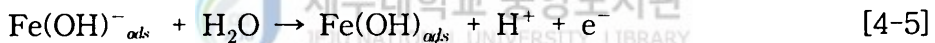
이 반응의 결과로 국부적으로 높아진 pH가 양극으로부터 어느 정도 떨어진 지점에서 부식생성물이 석출되게 된다. 또한 일단 3가의 철 이온이 만들어지면 또 다른 환원반응도 일어날 수 있다.



이후 음극반응 단계는 3가의 녹을 마그네타이트로 다음과 같이 환원시킬 수 있다.



이러한 과정은 습윤 상태에서 발생한다. 반면에 철이온으로의 산화반응의 기본반응은 중성 및 산성용액에서 다른 기구로 거동한다. 하지만 황산염 농도가 아주 낮을 때는 철의 용해 기구는 다음과 같다.



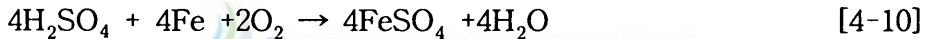
$\text{FeSO}_4$ 의 pH 조절 효과 때문에 양극 위치에서 상대적으로 낮은 pH가 만들어지고 이는 철의 수산화물의 석출을 방지한다. 이는 황산염 이온에 의한 가속적인 양극반응이 촉진됨을 의미한다. 강과 녹 사이의 계면에서 철은  $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  형태로 존재한다. 그래서 용해 가능한 황산염을 안정한 상태를 만들게 된다.

녹내에서는 다음과 같은 반응이 진행되는데, 이러한 산화성 물 분해

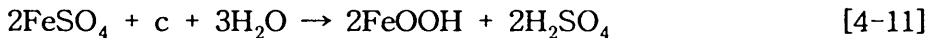
반응은 대기부식의 제안된 기구들의 대부분에서 중요한 역할을 한다. 음극환원으로 생성된 마그네타이트는 물이 존재하는 상황에서 산소에 의하여 재 산화 된다.



산이 발생하는 조건에 기초하여 제안된 대기부식의 이론에 있어서 녹층내에서 흡수된  $\text{SO}_2$ 의 산화에 의하여 생성된 황산은 아래와 같은 전체 반응에 의하여 강을 부식시킨다.



황산은 다음의 반응에 의하여 다시 생성된다.



그러나  $\text{FeSO}_4$ 의 산화성 물 분해 반응은 매우 느리고, 초기 단계에서만 부식에 영향을 미친다. 부식속도는 시간에 따라 일정하지 않다. 초기 단계에서 부식속도는 형성된 녹이 다공성이며, 치밀한 보호피막 역할을 하지 못하여 다소 빠르다. 이러한 초기 단계는 대기의 부식성에 따라 1-5년 동안 지속된다. 초기단계 후에는 보호피막이 향상되어 부식속도는 감소한다.

대기부식에 있어서 가장 주요한 인자는 습윤(wetting)시간, 대기의 오

염원인  $\text{SO}_2$ 와 해양대기에서 염화물이다.

#### 4.6.2 구리

구리는 대기 중에 노출되면 구리수산화물이 형성되어 patina라는 보호 피막을 만들어서 부식의 진행을 억제하게 된다. patina의 형성은 대기환경에 의존하며, 초기에는 진한 색을 보이다가 점차 녹색으로 변한다. 도심과 공업지역의 대기에서는 구리, 수산화물, 황산염의 혼합물이며, 해양 환경에서는 구리, 수산화물, 염화물의 혼합물이다.

구리는 기전력(electromotive force; emf) 계열에서 수소에 비하여 귀(noble)한 위치에 있으며, 열역학적으로 물에서와 산소가 없는 비산화성 산(non-oxidizing acid)에서 부식반응이 일어나지 않는다. 따라서 구리가 부식되기 위해서는 산소나 산화제가 존재해야 한다.

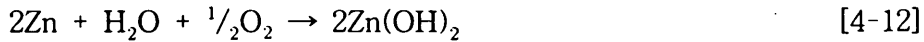
대부분의 경우에 초기 부식생성물은 산화제이구리( $\text{Cu}_2\text{O}$ )와 산화제일 구리( $\text{CuO}$ )이다. 이러한 구리산화물이 공기 중에 존재하는  $\text{SO}_x$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ 같은 오염물과 천천히 반응하여 염을 만든다. 이러한 반응이 진행하기 위해서는 충분히 pH가 높아야 한다.

#### 4.6.3 아연

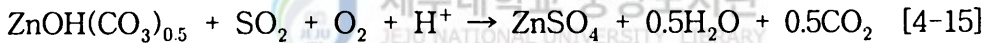
아연은 탄소강에 비하여 대기부식에 대한 저항성이 훨씬 우수하다. 아연의 부식속도는 주로 TOW와 대기 중 존재하는  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{Cl}^-$ 에 의하여 영향을 받는다.

아연은 상대적으로 염기성 금속이며, 대기부식은 아연 수산화물을 만들면서 시작된다. 아연 수산화물은 여러가지 결정구조를 가지며, 순차적으로 염기성 아연 탄산염( $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ )를 만든다. 수용액 층의 pH가 초기 부식생성물의 안정성을 좌우하며,  $\text{Zn}^{2+}$ 로의 용해를 일어나며 아연

은 수산화물을 만들면서 산화된다. 즉 아래의 반응으로 나타나게 된다.



이러한 반응은 아연의 산화반응과 산소의 환원반응을 포함한다. pH가 높으면 아연 수산화물과 염기성 아연 염은 외부로부터 표면을 보호하는 아연 patina를 형성한다.  $\text{SO}_x$ 나 산성비에 의하여 표면 수분의 pH가 낮게 유지되면 아연 수산화물이나 염이 생성되지 않고, 생성되어 있던 염기성 생성물도 용해되게 된다.



황산아연( $\text{ZnSO}_4$ )은 물에 녹으며, 비에 의하여 씻겨서 빠른 부식속도를 만들게 할 수 있다. 아연이 계속 노출되어 대기 오염물의 종류에 따라 서로 다른 여러 반응단계를 거칠 수 있다.

염기성의 아연 탄산염은 오염이 없는 전원지역(rural area)에서 천천히 자라다가 보호성이 있는 염기성의 아연 황산염의 형성이 일어나기도 한다.  $\text{SO}_2$ 보다 더 많은 양의  $\text{Cl}^-$ 이 표면에 붙게 되면 보호성이 덜한 염기성의 아연 염화물이 생성된다.

아연은 흰색의 녹(백청)이 발생하는 조건은 pH가 8.2 이상인 조건에서 보호성이 낮은 아연 탄산염이 만들어지기 때문이다. 흰 녹발생 원인은 구체적으로 밝혀지지 않았으나, 비가 많이 오는 경우에 또는 절연재로 사용되는 유리솜과 같은 재료가 표면에 닿아서 공기의 흐름을 막아서 마

르지 않게 하는 경우에 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.

아연은 부식 저항성이 우수한 재료이며, 부식속도는  $0.5-1.0\mu\text{m}$  정도 이다. 그러나 이산화황과 같은 오염이 삼한 경우  $5\mu\text{m}$  정도의 부식이 진행할 수 있다.

#### 4.6.4 알루미늄

알루미늄의 대기부식 저항성은 부착력이 우수하고 치밀한 산화피막이 표면에 형성되어 발생한다. 대기환경에서 형성되는 부식생성물은 비정질의  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$ ,  $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ 들이다. 산화피막은 내층에는 보다 치밀한 형태의 구조이고, 바깥쪽은 다공성 형태이다.

도심의 대기에서는 보호성이 있는 산화피막이 생성되지만  $\text{SO}_2$ 가 너무 많으면 pH가 너무 낮아져서 보호막의 용해를 일으킨다. 염소이온이 존재하는 경우 공식이 시작된다. Pit 내에서 알루미늄의 산화반응이 일어나고 산소나  $\text{H}^+$ 의 환원반응이 pit에서 일어난다.



## V. 결론

해안지역에 도시를 형성하고 있는 제주도의 대기부식을 평가하기 위하여 제주도의 동부, 서부, 남부, 북부지역과 중앙부인 한라산 지역 즉, 성산포, 고산, 서귀포, 제주시청, 한라산 천아오름의 5개 지역을 대기부식 측정 장소로 정하여 2003년 9월부터 2004년 8월까지 1년간 습윤시간, 아황산가스, 대기 중 염화물의 대기환경 영향인자와 탄소강, Cu, Zn, Al,의 표준 금속의 부식량을 조사하여 ISO표준에 의해 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 대기부식의 환경영향인자를 살펴보면 아황산가스의 등급은 전 지역에서 소량의 등급인 P0로서 제주도가 청정지역임을 나타내며, TOW는 T3와 T4로 아열대지역의 특색을 나타내 주었으며, 염화물등급은 해안거리에서 3km 이내의 지역인 고산, 서귀포, 성산, 제주시에서는 S2와 S3로 해안지역의 특색을 나타내고 천아오름은 S1 등급으로 산림지역의 특색을 나타낸다.
- (2) 제주도 각 지역에서의 대기부식을 보면 금속의 부식에 영향을 미치는 대기환경영향인자는 TOW, Cl 이며 이들이 큰 고산과 성산포 지역이 제주시청, 서귀포 및 천아오름 보다 부식량이 크고, 계절별로는 여름철이 겨울철에 비하여 부식량이 크다.
- (3) 대기 환경인자에 의해 평가된 부식등급은 실제 표준패널 방법을 이용한 옥외의 부식등급과 재료별, 지역별로 양호한 일치를 나타낸다. 재료별 대기 부식량은 탄소강이 가장 크고 동, 아연, 알루미늄 순으로



나타났다.

- (4) 다중회귀분석을 통하여 대기환경영향 인자가 각 재료에 미치는 영향을 살펴본 결과 지역적 특색으로 인한 천아오름 지역을 제외하면, 다른 금속과 지리적 특색에 따라 부식감량이 뚜렷하게 나타나는 탄소강의 상관계수평균이 0.82로 구리: 0.69, 아연: 0.58, 알루미늄: 0.58에 비하여 많은 상관관계가 있음을 알았다.



## 참고문헌

- [1] 한국가스공사 연구개발원, 2000, "강구조물의 부식감시 및 방지기술 개발", 과학기술부 연구보고서, III-1 ~ III-107.
- [2] ISO 9223, 1992, Corrosion of Metals and Alloys-Classification of corrosivity of atmospheres.
- [3] ISO 9224, 1992, Corrosion of Metals and Alloys-Atmospheric corrosion. Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres.
- [4] ISO 9225, 1992, Corrosion of Metals and Alloys-Atmospheric corrosion. Aggressivity of atmospheres-methods of measurement of pollution data.
- [5] ISO 9226, 1992, Corrosion of Metals and Alloys-Atmospheric corrosion. Corrosivity of atmospheres-methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
- [6] Dean.S.W, 1987, "Atmospheric Corrosion after 80 Year of Study," Materials Performance, Vol. 26, No. 7, pp. 9-11.
- [7] Oh.S.J, Cook.D.C and H.E.Townsend, 1999, "Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments", Corrosion Science, Vol. 41, pp. 1687-1702.
- [8] Vera.R, Rosales.B.M and Tapia.C, 2003, "Effect of the exposure angle in the corrosion rate of plain carbon steel in a marine atmosphere", Corrosion Science, Vo. 145, pp. 321-337.
- [9] Qu.Q, et.al, 2002, "Effects of NaCl and SO<sub>2</sub> on the initial atmospheric corrosion of zinc", Corrosion Science, Vol. 44, pp.

2789-2803.

- [10] Vilche.J.R, et.al, 1997, "A survey of Argentinean atmospheric corrosion: 2-Copper samples", Corrosion Science, Vol. 39, No. 4, pp. 655-679.
- [11] Vilche.J.R, et.al, 1995, "A survey of Argentinean atmospheric corrosion: 1-Aluminium samand Zinc samples", Corrosion Science, Vol. 37, No. 6, pp. 941-961.
- [12] Minger.A.U.L, et.al, 2002, "Dose-response functions for weathering steel, copper and zinc obtained from a four-year exposure programme in Switzerland", Corrosion Science, Vol. 44, pp. 675-687.
- [13] Mendoza.A.R and Corvo.F, 1999, "Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel", Corrosion Science, Vol. 41, pp. 75-86.
- [14] Mendoza.A.R and Corvo.F, 2000, "Outdoor and indoor atmospheric corrosion of non-ferrous metals", Corrosion Science, Vol. 42, pp. 1123-1147.
- [15] Corvo.F, et.al, 1997, "Atmospheric corrosivity in the Caribbean Area", Corrosion Science, Vol. 39, No. 5, pp. 823-833.
- [16] Maldonado.L and Veleza.L, 1999, "Corrosivity category maps of a humid tropical atmosphere", the Yucatan Peninsula, Mexico, Materials and Corrosion, Vol. 50, pp. 261-266.
- [17] Ahmad.Z, Allam.I.M and Aleem.B.J.A, 2000, "Effect of environmental factors on the atmospheric corrosion of mild steel in aggressive sea coastal environment", Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 47, No. 4, pp. 215-220

부 록

1. 각 지역별 대기환경 자료

(1) Airborne Chloride

		C(mgNaCl/d/100cm <sup>2</sup> )											
		2003.	2003.	2003.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
Chuna		0.004091977	0.003786562	0.000980531	0.008131056	0.006094118	0.007724011	0.003802235	0.004091977	0.000663395	0.000569782	0.002390811	0.002313002
Gosan		0.135292688	0.070931911	0.129855097	0.164684996	0.148614221	0.148379369	0.128480811	0.136973822	0.00657134	0.010147237	0.105872945	0.069893623
Seogwipo		0.021972877	0.017356101	0.016801488	0.011708598	0.012091376	0.017479691	0.014433629	0.014484505	0.00301897	0.005511482	0.023931513	0.026011641
Seongsan		0.012004205	0.034755977	0.033114137	0.032253709	0.031868306	0.037658627	0.021993165	0.036688696	0.016382788	0.11766603	0.040823201	0.062512575
Jeju		0.026434305	0.018176324	0.013755312	0.012545955	0.01349922	0.007505102	0.004913472	0.009262714	0.001948235	0.003699266	0.026434305	0.021407541

(2) Sulfur Dioxide

		SO <sub>2</sub> (ppm)												
		2003.	2003.	2003.	2003.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.	2004.
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Chuna	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	
Gosan	0.002	0.002	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	
Seogwipo	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	
Seongsan	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.002	0.004	0.005	0.003	0.002	0.003	
Jeju	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	

(3) Time of Wetness(TOW)

	TOW(h)															
	2003. 9	2003. 10	2003. 11	2003. 12	2004. 1	2004. 2	2004. 3	2004. 4	2004. 5	2004. 6	2004. 7	2004. 8				
Chuna	384	125	258	43	65	42	57	133	303	342	194	282				
Gosan	624	170	233	26	60	88	105	269	489	435	614	413				
Seogwipo	346	55	145	21	19	66	67	151	351	320	470	220				
Seongsan	504	134	291	78	121	110	117	204	452	428	539	378				
Jeju	225	97	215	30	60	34	39	96	213	262	55	183				

## 2.각 지역별 시험편 무게 증가량 및 감소량

### (1)감소량

(a)Gosan

(단위:g)

year.	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.2446	0.8158	0.042	0.0496	0.0062	0.0073	0.0042	0.0068
2003.10	0.0864	0.2316	0.0123	0.0504	0.0333	0.078	0.0029	0.0039
2003.11	0.1951	0.5227	0.0344	0.0778	0.0048	0.0149	0.0032	0.0079
2003.12	0.0904	0.377	0.0183	0.0508	0.0027	0.0182	0.0016	0.0058
2004.1	0.1043	0.3482	0.0213	0.0483	0.0085	0.0144	0.0053	0.0073
2004.2	0.1277	0.4236	0.0262	0.0691	0.0098	0.0154	0.0012	0.0066
2004.3	0.1171	0.3987	0.0276	0.0588	0.0072	0.0126	0.0014	0.0065
2004.4	0.1282	0.4867	0.0182	0.0553	0.0053	0.0122	0.0259	0.0264
2004.5	0.0955	0.4029	0.0327	0.0574	0.017	0.0393	0.0214	0.0278
2004.6	0.069	0.2711	0.0357	0.0626	0.0333	0.0238	0.0168	0.0242
2004.7	0.2197	1.2951	0.0262	0.142	0.0173	0.0236	0.0027	0.0079
2004.8	0.1528	0.484	0.0219	0.0596	0.0099	0.0304	0.002	0.0053

(b)Seogwipo

(단위:g)

year. month	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.0756	0.1563	0.0118	0.0257	0.0428	0.0515	0.0029	0.0035
2003.10	0.0507	0.1406	0.0093	0.0286	0.0102	0.0313	0.0032	0.0049
2003.11	0.0759	0.1569	0.0138	0.0226	0.0032	0.0082	0.0021	0.0025
2003.12	0.0366	0.0622	0.0085	0.0158	0.0044	0.006	0.0022	0.0091
2004.1	0.0252	0.062	0.0082	0.0126	0.0014	0.0043	0.0014	0.0019
2004.2	0.0599	0.1139	0.0135	0.0201	0.0028	0.005	-0.0013	0.0011
2004.3	0.0499	0.1185	0.0105	0.0218	0.0023	0.0047	0.0005	0.0027
2004.4	0.0444	0.1196	0.0077	0.0193	0.0019	0.0069	0.0161	0.0325
2004.5	0.0521	0.2567	0.0206	0.046	0.0423	0.0127	0.021	0.0203
2004.6	0.0661	0.1575	0.0209	0.0357	0.0414	0.007	0.0132	0.02
2004.7	0.1435	0.3314	0.0267	0.0307	0.0352	0.007	0.0018	0.005
2004.8	0.1241	0.3195	0.023	0.0436	0.0066	0.0206	0.0019	0.0036

(c)Seongsan



(단위:g)

year. month	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.1667	0.3364	0.013	0.0362	0.0092	0.0168	0.0027	0.0036
2003.10	0.082	0.2282	0.0143	0.0436	0.016	0.054	0.0042	0.0045
2003.11	0.1313	0.3829	0.0216	0.034	0.004	0.0121	0.0033	0.0057
2003.12	0.064	0.1453	0.0118	0.0243	0.004	0.006	0.003	0.0023
2004.1	0.0532	0.1726	0.0126	0.0257	0.0048	0.0091	0.0032	0.0046
2004.2	0.1097	0.1978	0.0161	0.035	0.0043	0.0067	0.0006	0.0046
2004.3	0.0797	0.1871	0.0101	0.0253	0.0011	0.003	0.0022	0.0044
2004.4	0.0688	0.166	0.0093	0.0259	0.0017	0.0049	0.0242	0.027
2004.5	0.1022	0.3635	0.0269	0.0438	0.0036	0.016	0.0174	0.0204
2004.6	0.0885	0.2848	0.0243	0.0504	0.0036	0.0114	0.0189	0.0219
2004.7	0.1762	0.6358	0.032	0.0522	0.0062	0.0067	0.0032	0.0041
2004.8	0.2394	0.5209	0.0508	0.0665	0.0116	0.0388	0.0031	0.0137



(d)Chuna

(단위:g)

year. month	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.052	0.1368	0.0221	0.0382	0.0171	0.0598	0.0032	0.0041
2003.10	0.0369	0.0712	0.0054	0.0259	0.064	0.0796	0.0043	0.0049
2003.11	0.0516	0.196	0.0081	0.0339	0.0053	0.0136	0.0025	0.0032
2003.12	0.032	0.1147	0.0114	0.0262	0.0042	0.0094	0.0012	0.0034
2004.1	0.0216	0.0664	0.0085	0.022	0.0029	0.0114	0.0019	0.004
2004.2	0.056	0.1542	0.0113	0.0287	0.0005	0.0066	0.001	0.0036
2004.3	0.0403	0.1165	0.0087	0.0229	0.0009	0.007	0.0017	0.004
2004.4	0.0198	0.126	0.0077	0.028	0.0009	0.0092	0.027	0.0314
2004.5	0.0226	0.1476	0.009	0.0419	0.0034	0.0134	0.0193	0.0194
2004.6	0.0239	0.1289	0.0127	0.0318	0.0029	0.0133	0.0219	0.0199
2004.7	0.0443	0.2113	0.0117	0.0368	0.006	0.0103	0.0014	0.0028
2004.8	0.0526	0.167	0.0126	0.032	0.0099	0.0132	0.002	0.0039

(e)Jeju city



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(단위:g)

year. month	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.1614	0.3149	0.0132	0.0277	0.0066	0.0367	0.0052	0.0055
2003.10	0.0688	0.209	0.0114	0.0357	0.0186	0.0558	0.0041	0.0052
2003.11	0.0848	0.2931	0.0153	0.0285	0.0012	0.0128	0.0027	0.0045
2003.12	0.0448	0.0823	0.0121	0.0187	0.0018	0.005	0.0006	0.0032
2004.1	0.0451	0.1015	0.0112	0.0171	0.0032	0.0122	0.0016	0.0051
2004.2	0.0559	0.1153	0.0101	0.0198	0.0024	0.0081	0.0019	0.0034
2004.3	0.0415	0.0928	0.0077	0.0168	0.0017	0.0062	0.0019	0.003
2004.4	0.0331	0.1019	0.0069	0.0144	0.0021	0.005	0.0297	0.0294
2004.5	0.0214	0.1405	0.0071	0.022	0.0021	0.0102	0.0204	0.0157
2004.6	0.0496	0.1354	0.0147	0.024	0.0028	0.0086	0.0161	0.022
2004.7	0.0418	0.3364	0.0092	0.0172	0.0046	0.0069	0.0014	0.0018
2004.8	0.094	0.3884	0.0177	0.0387	0.0079	0.0339	0.0028	0.004

(2)증가량

(a)Gosan

(단위:g)

year.	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.0681	0.5051	0.0048	0.0067	0.0148	0.0053	0.0037	0.0105
2003.10	0.0462	0.1452	0.0023	0.0088	0.0016	0.0041	0.0022	0.004
2003.11	0.1108	0.3665	0.0065	0.0143	0.0033	0.0054	0.004	0.0115
2003.12	0.0612	0.2865	0.0044	0.0129	0.0046	0.0105	0.0053	0.0148
2004.1	0.0359	0.255	0.0069	0.0126	0.0086	0.0098	0.015	0.0135
2004.2	0.0849	0.3044	0.0059	0.0171	0.0035	0.0101	0.008	0.0188
2004.3	0.0883	0.2815	0.0082	0.0136	0.0059	0.0073	0.0071	0.0136
2004.4	0.0869	0.3405	0.0056	0.0126	0.0022	0.0082	0.0058	0.0308
2004.5	0.0595	0.2606	0.0034	0.0067	0.003	0.0097	0.0043	0.0126
2004.6	0.0303	0.1804	0.004	0.0071	0.002	0.0017	0.0033	0.0076
2004.7	0.0378	0.8822	0.0049	0.0242	0.0046	0.0108	0.0037	0.0108
2004.8	0.0505	0.2928	0.0035	0.0067	0.0026	0.009	0.0038	0.006



(b)Seogwipo

(단위:g)

year.	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.067	0.0757	0.0006	0.0023	0.0032	0.0022	0.0012	0.0021
2003.10	0.0259	0.0869	0.0015	0.0046	0.001	0.0021	0.0009	0.0018
2003.11	0.038	0.0892	0.0013	0.001	0.0001	0.0001	0.0014	0.0006
2003.12	0.0237	0.0413	0.0001	0.0007	0.0005	0.0007	0.0001	0.001
2004.1	0.0166	0.0434	0.0033	0.004	0.0031	0.0022	0.0024	0.0022
2004.2	0.0401	0.0769	0.0026	0.0031	0.0031	0.0003	0.0055	0.0028
2004.3	0.036	0.0786	0.0036	0.0039	-0.0027	0.0004	0.0029	0.0023
2004.4	0.0279	0.0763	0.0042	0.003	0.0029	0.001	0.0033	0.0029
2004.5	0.0292	0.1741	0.0019	0.0017	0.0036	-0.0009	0.002	0.0025
2004.6	0.0268	0.0927	0.001	0.0026	0.0023	0.0019	0.0012	0.0023
2004.7	0.0271	0.1986	0.0033	0.0034	0.0031	0.0026	0.0014	0.0031
2004.8	0.0452	0.1875	0.0022	0.004	0.0029	0.0061	0.0031	0.0024

(c)Seongsan

(단위:g)

year.	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.0535	0.1929	0.0017	0.0039	0.0026	0.002	0.001	0.0027
2003.10	0.0474	0.1414	0.0026	0.0074	0.002	0.0026	0.0019	0.0033
2003.11	0.0671	0.239	0.0024	0.0026	0.001	-0.0001	0.0017	0.0035
2003.12	0.0423	0.1029	0.0023	0.0042	0.0003	0.0018	0.0032	0.0031
2004.1	0.0409	0.1203	0.0047	0.0058	0.0041	0.0026	0.003	0.0044
2004.2	0.0783	0.1365	0.004	0.0063	0.0056	0.0016	0.0092	0.005
2004.3	0.0562	0.1265	0.0041	0.0039	0.0051	0.0017	0.0055	0.0032
2004.4	0.0467	0.1043	0.0037	0.0032	0.0037	0.0007	0.0067	0.0055
2004.5	0.0587	0.234	0.0035	0.0024	0.0037	-0.0009	0.0042	0.0052
2004.6	0.034	0.1917	0.0032	0.0055	0.0026	0.0014	0.0027	0.004
2004.7	0.0411	0.4319	0.0061	0.0068	0.0066	0.0026	0.0035	0.0042
2004.8	0.0746	0.358	0.0082	0.0067	0.0078	0.0126	0.0051	0.01

(d)Chuna



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(단위:g)

year.	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.0206	0.0685	0.0005	0.0028	0.0032	0.0023	0.0007	0.0004
2003.10	0.0171	0.035	0.0008	0.0027	0.0002	0.0003	0.0005	0.0009
2003.11	0.0263	0.1096	0.0009	0.0018	0.0011	-0.0013	0.0008	0.0436
2003.12	0.0193	0.0767	0.0013	0.0041	0.0009	0.0013	0.0023	0.0035
2004.1	0.0155	0.0448	0.002	0.0043	0.0022	0.0037	0.0011	0.0019
2004.2	0.0366	0.0998	0.0024	0.0034	0.0029	0.0006	0.0027	0.0021
2004.3	0.0272	0.0744	0.0025	0.0025	0.0022	0.0009	0.0024	0.0123
2004.4	0.0108	0.0753	0.002	0.0035	0.0024	0.0016	0.0022	0.0037
2004.5	0.0097	0.0891	0.0049	0.0006	0.003	-0.0013	0.0022	0.0007
2004.6	0.0054	0.0622	0.0013	0.0027	0.0012	0.0006	0.0007	0.0016
2004.7	0.0134	0.1281	0.0002	0.0027	-0.0001	-0.0027	0.0004	0.0003
2004.8	0.0143	0.0797	0.0005	0.0003	0.0019	0.0005	0.0008	0.0007

(e)Jeu city

(단위:g)

year.	Carbon Steel		Cu		Zn		Al	
	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor	indoor	outdoor
2003.9	0.0615	0.1831	0.0011	0.0026	0.0025	0.0008	0.0011	0.0038
2003.10	0.0339	0.1222	0.0012	0.0052	0.0014	0.0023	0.0013	0.0042
2003.11	0.046	0.1816	0.0013	0.0015	0.0008	0.0004	0.0015	0.003
2003.12	0.0303	0.056	0.0026	0.0032	0.0038	0.0033	0.0046	0.0049
2004.1	0.0292	0.0658	0.0035	0.0042	0.0049	0.0045	0.0037	0.0059
2004.2	0.0353	0.0741	0.0023	0.0031	0.0032	0.0031	0.0026	1.0036
2004.3	0.025	0.054	0.0028	0.0029	0.0034	0.0019	0.0021	0.0026
2004.4	0.0164	0.0546	0.0016	0.0025	0.0012	0.0011	0.0019	0.0037
2004.5	0.0129	0.0893	0.0005	0.0006	0.001	-0.0008	0.0009	0.0007
2004.6	0.0186	0.079	0.0015	0.0024	0.0007	0.0013	0.001	0.0017
2004.7	0.0123	0.0403	-0.0002	0.0016	0.0001	-0.0002	0.001	0.0007
2004.8	0.0317	0.207	0.0021	0.0046	0.0015	0.0122	0.0026	0.0035



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

## 감사의 글

많은 계획과 꿈을 안고 대학원에 입학한지가 엇그제 같은데 벌써 졸업논문의 마지막 페이지인 감사의 글을 쓰려고 하니 아쉬움이 많이 남는 2년의 대학원 생활이었다는 생각이 듭니다.

대학원 2년의 생활 동안 너그러움과 냉철한 지도로 항상 부족한 저를 지도해 주시고 이끌어 주셨던 김귀식 교수님에게 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 저의 대학원 생활이 아무 탈 없이 무사히 마칠 수 있도록 물심양면으로 도와주신 은혜 정말 잊지 않도록 하겠습니다. 그리고 항상 실험실에서 같이 의지하고 생활한 세웅이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 실험실의 오명범 선배님과 현창해 선생님께도 감사의 말을 전합니다.

항상 묵묵히 저희를 지켜봐주시는 권기린 교수님과 누리사업단장님으로 더욱 더 바쁘게 보내시는 허종철 교수님, 항상 인자하시고 너그러우신 현명택 교수님, 강인하게 보이면서도 부드럽고 유머 있는 임종환 교수님, 논문심사를 해주셨던 정동원 교수님께 감사의 말을 전합니다. 그리고 항상 웃으시며 반겨주시는 최경현 교수님과 항상 아낌없이 많은 조언을 해주시는 조경호 교수님, 선배님처럼 다정한 강철웅 교수님, 공학도가 걸어야 할 길을 잘 말씀해주시는 김상재 교수님, 마지막으로 4학년 시절부터 첫 제자라고 하시며 많은 도움을 주시고 가르침을 주신 박윤철 교수님께도 머리 숙여 감사의 말을 전합니다.

논문준비로 자주 학과 사무실을 비우는 데도 아무 내색도 하지 않고 논문이나 잘 쓰라며 위로해준 승훈이 형과 희철이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 이번 실험을 정말 많이 도와준 실험실의 우진이, 승훈이, 그리고 이제 실험실 생활을 같이 하게 된 명근이와 재석이 정말 고맙다. 같이 졸업하는 재철이형, 상혁이형, 대현이, 재신이 2년 동안 수고 많았고, 동원이형, 원호형, 석우형, 승현이형, 상철이형, 수환이형, 지영이형, 병찬, 형훈, 현길 등 선후배님께 감사의 말을 전합니다. 그리고 논문 잘 쓰라며 힘을 준 친구들아 정말 고맙다.

마지막으로 조용히 지금의 제가 있을 수 있게 해주신 아버지, 어머니, 형, 형수님, 여동생 갑비에게도 감사의 마음 전합니다.

2004년 12월 어느 새벽에... 양경조